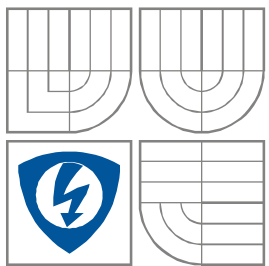


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

QUADROCOPTER – NAVIGAČNÍ MODUL

QUADROCOPTER – NAVIGATION UNIT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAVID JURAJDA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: David Jurajda

ID: 112048

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Quadrocopter - navigační modul

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s možnostmi navigace miniaturních letových prostředků.

Navrhněte a realizujte vlastní navigační modul. Modul otestujte a ověřte jeho parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

H.R. Everett, Sensors for Mobile Robots - Theory and Application, A K Peters, 1995, ISBN 1-56881-048-2

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 30.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou navigace létajícího experimentálního prostředku známého jako quadcopter. Zejména je řešena navigace v otevřeném prostoru pomocí globálního navigačního satelitního systému GPS. Úvodní část se zabývá přiblížením systému GPS a jeho využitelností v projektu Quadrocopter. Následující část práce je věnována konstrukci navigačního modulu. Závěrečná část se věnuje zpracování dat a jejich využití pro navigaci modelu.

Klíčová slova

Quadrocopter, vrtulník, GPS, navigace, AVR, USART, TWI, ATmega16,

Abstract

This bachelor's thesis deals with navigation of the experimental flying device called Quadrocopter. It deals especially with navigation in open space by using global navigation satellite system GPS. The opening part of my thesis deals with GPS options and utilization in the Quadrocopter project. The middle part discusses design of the navigation module and the final part deals with data processing and its usage in navigation.

Keywords

Quadrocopter, Helicopter, GPS, Navigation, AVR, USART, TWI, ATmega16

Bibliografická citace:

JURAJDA, D. *Quadrocopter – navigační modul*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 54s. Vedoucí bakalářské práce byl doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Quadrocopter – navigační modul jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: **28. března 2011**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Luděkovi Žaludovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **28. března 2011**

.....
podpis autora

Obsah

1	ÚVOD	11
2	VÝBĚR LÉTAJÍCÍHO PROSTŘEDKU.....	13
3	PODOBNÉ PROJEKTY	14
3.1	NG UAVP	14
3.2	Paparazzi.....	14
3.3	Autopilot	14
3.4	MicroKopter	14
4	NAVIGACE A GPS.....	15
4.1	GPS – historický úvod	15
4.2	GPS – technický úvod.....	15
4.3	Metody zpřesnění GPS	16
5	NAVIGAČNÍ MODUL.....	18
5.1	GPS modul	18
5.1.1	Výběr GPS modulu	18
5.1.2	OEM GPS modul Fastrax UP500	19
5.2	Mikrokontrolér	21
5.2.1	TWI.....	21
5.2.2	USART.....	22
5.2.3	SPI.....	22
5.3	Konvertor napětíových úrovní TWI sběrnice	22
5.4	Paměťová karta.....	23
5.5	Obvodové řešení a DPS	24
6	POMOCNÉ OBVODY	26
6.1	Testovací a napájecí modul.....	26
6.2	Převodník TWI <-> USB	27
7	SIMULACE POHYBU QUADROPTERU	28
7.1	Eliminace sférických souřadnic.....	31
8	KOMUNIKAČNÍ PROTOKOLY	33
8.1	Komunikace GPS UP500 <-> MCU ATmega16	33
8.2	Komunikace navigační modul <-> hlavní jednotka.....	34
9	LETOVÉ STAVY.....	36
9.1	Vis	36
9.2	Let z bodu A do B po přímé dráze.....	37

9.3 Let po kruhové dráze	39
10 PROGRAMOVÁ ČÁST	41
10.1 Vývojové nástroje.....	41
10.2 Struktura programu.....	41
10.3 Průběh programu	42
10.3.1 Programové řešení visu	44
10.3.2 Programové řešení letu z bodu A do B.....	45
11 MĚŘENÍ.....	47
12 MOŽNOSTI VÝVOJE.....	49
13 ZÁVĚR.....	50
14 POUŽITÁ LITERATURA	52

Seznam obrázků

Obrázek 1: Princip DGPS SBAS	17
Obrázek 2: Blokové schéma navigačního modulu.....	18
Obrázek 3: Rozložení pinů UP500, převzato z [11]	20
Obrázek 4: Ilustrační schéma sběrnice TWI.....	21
Obrázek 5: Ilustrační schéma sběrnice USART	22
Obrázek 6: Ilustrační schéma sběrnice SPI	22
Obrázek 7: Konvertor napět'ových úrovní TWI sběrnice.....	23
Obrázek 8: Rozložení pinů SD a microSD karty	23
Obrázek 9: Navigační modul.....	25
Obrázek 10: Blokové schéma testovacího a napájecí modulu.....	26
Obrázek 11: Testovací a napájecí modul	27
Obrázek 12: Fyzikální představa quadcoptoru	28
Obrázek 13: Simulační schéma odporu prostředí	29
Obrázek 14: Simulační schéma regulace náklonu	30
Obrázek 15: Simulační schéma tahu motorů při změně natočení	31
Obrázek 16: Přenos dat po TWI	35
Obrázek 17: Rozvětvený regulační obvod regulátoru pozice.....	37
Obrázek 18: Odezva systému na jednotkový skok žádané veličiny o velikosti 50 m.....	37
Obrázek 19: Let z bodu A do B pomocí změny azimutu quadcoptoru	38
Obrázek 20: a) Let po kruhové dráze, b) Kompenzace odstředivé síly.....	39
Obrázek 21: Struktura řídicího programu	42
Obrázek 22: Vývojový diagram hlavního řídicího programu.....	43

Obrázek 23: Vývojový diagram algoritmu visu	45
Obrázek 24: Vývojový diagram algoritmu letu z bodu A do B	46
Obrázek 25: Histogram pozice na ose x, 1000 vzorků, 5Hz	47
Obrázek 26: Histogram pozice na ose y, 1000 vzorků, 5Hz	48
Obrázek 27: Histogram výšky, 1000 vzorků, 5Hz.....	48

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání parametrů GPS OEM modulů	19
Tabulka 2: Význam pinů UP500, převzato z [11]	20
Tabulka 3: Názvy pinů SD karty	24
Tabulka 4: Význam NMEA věty RMC.....	34

Seznam zkratek

2DRMS	2D Root Mean Square
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CEP	Circular Error Probable
CR	Carriage Return
DGPS	Differential Global Position System
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
FAT	File Allocation Table
GBAS	Ground Based Augmentation Systems
GGA	Global Positioning System Fix Data
GNSS	Global Navigation Satellite System
GNU	GNU's Not Unix
GPL	General Public License
GPS	Global Position System
GSA	DOP and Active Sattelites
GSV	Sattelites in view
I2C	Inter-Integrated Circuit
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
NAVSTAR	Navigation Timing and Ranging Global Position System
NMEA	National Marine Electronics Association
OEM	Original Equipment Manufacturer

RMC	Recomended Minimum Specific GNSS Data
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SD	Secure Digital
SPI	Serial Peripheral Interface
TWI	Two Wires Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver / Transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USART	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter
USB	Universal Serial Bus
WGS84	World Geodetic System 1984

1 ÚVOD

Člověk byl většinu své existence vázán na zemský povrch. Až díky rozvoji letectví ve 20. stol. si může dopřát pohled na svět z ptačí perspektivy. V současnosti je možné realizovat malý bezpilotní létající prostředek, tzv. UAV (Unmanned Aerial Vehicle), který lze využít pro účely telemetrie. Nejvhodnější koncepce pro takovou aplikaci je quadcopter (zvaný také quadrotor). Jedná se o typ vrtulníku, který ke svému pohybu v prostoru využívá čtyři vrtule. Výhody tohoto uspořádání se projeví zejména na malém experimentálním modelu. Výhodou je především jednoduchá konstrukce, kde absence složité mechaniky zvyšuje spolehlivost provozu a v případě nehody omezuje rozsah škod. Další charakteristické vlastnosti jsou kolmý start a přistání a možnost visu ve vzduchu. Protože tato koncepce neobsahuje pevné křídlo, nelze využít při pohybu vztlaku na křídle a proto je quadcopter vhodný pro lety na krátkou vzdálenost a pro vis.

Oblast bezpilotních prostředků je v současné době perspektivní, rychle se rozvíjející částí trhu. Velký zájem projevuje zejména armádní sektor. Významnou částí je také civilní sféra, kde je možné bezpilotní prostředky využívat k monitorování dopravy, dokumentaci havárií, vizuálním kontrolám nepřístupných míst ve výškách. Využití lze také nalézt v kartografii a archeologii. V neposlední řadě jsou UAV prostředky využívány pro zábavu.

Cílem celého projektu, který je rozdělen do 3 částí, je vytvořit letuschopný prototyp, schopný nést užitečnou zátěž (kamera, doplňkové senzory) tak, aby nebyly kladeny vysoké nároky na obsluhu. To vyžaduje návrh mechanické konstrukce, řídicí elektroniky a obslužného softwaru.

Tato práce rozebírá pouze dílčí část této komplexní problematiky. Zabývá se využitím globálního navigačního satelitního systému GPS (Global Position System). Popisuje návrh a realizaci hardwaru a softwaru navigačního modulu. Dále obsahuje popis zpracování dat z GPS modulu a jejich využití v algoritmech pro navigaci a generování trajektorie. Okrajově je přiblížen výběr typu létajícího prostředku. Nelze vytvořit univerzální létající stroj, vždy se jedná o kompromis mezi několika protichůdnými požadavky.

Zařazení GPS přijímače do senzorického subsystému quadcopteru rozšiřuje soubor vstupních dat o pozici quadcopteru v globální souřadné soustavě Země. Tato informace umožňuje realizaci navigačních úloh pro vedení quadcopteru po požadované dráze. To dovoluje rozšíření autonomních schopností quadcopteru tak, aby byla zjednodušena uživatelská obsluha (předem nastavená dráha letu, vis na místě, sledování bodu zájmu ...).

Dalšími oblastmi projektu quadcopter se zabývá práce Petra Gábrlíka Quadcopter – stabilizace a regulace [1], kde je popsána stabilizace natočení a náklonu

quadrocopteru a práce Jana Vomočila Quadrocopter – řídicí jednotka a komunikace [2], která rozebírá návrh hardwaru hlavní řídicí jednotky a obslužného softwaru pro PC.

2 VÝBĚR LÉTAJÍCÍHO PROSTŘEDKU

Abychom mohli vybrat vhodný typ létajícího prostředku, je nutné nejprve definovat typickou misi jeho použití. Nelze vytvořit univerzální létající prostředek. Vždy se jedná o nejlepší kompromis pro dané požadavky.

Definice typické mise použití:

Létající prostředek bude operovat v rozsahu maximálně několika set metrů od kontrolního stanoviště. Musí být schopen ve vzduchu setrvat na jednom místě. Protože bude využíván i v nebezpečných situacích (monitorování požáru), kde je vysoká pravděpodobnost poškození, měl by být lehce opravitelný. Prioritní je spolehlivost. Doba letu by měla být co největší, postačující je několik desítek minut. Je požadováno maximálně jednoduché ovládání tak, aby toto zařízení byl schopen používat i neodborně vzdělaný personál.

Výběr byl proveden z následujících možných typů:

- **vzducholod'** - komplikace s plnicím médiem, obtížná řiditelnost ve větru
- **konvertoplán** - letadlo, které je po sklopení křídla schopné visu, složitá mechanická konstrukce
- **letadlo s pevným křídlem** - nemožnost visu
- **vrtulník** - jeden hlavní rotor a malá vyrovnávací vrtulka, složitá mechanická konstrukce (rotorová hlava)
- **monocopter** - jedna velká vrtule, řízení pomocí stavitelných lamel), složitá mechanická konstrukce
- **quadrocopter** - čtyři přímo hnané vrtule, jednoduchá mechanická konstrukce, snadná realizace

UAV lze hodnotit z mnoha různých směrů, zajímavé rozdělení podle rozměrů a vytrvalosti je uvedeno na str. 300 v tab. 1 v materiálu [3]. Pro náš účel byl jako nejvhodnější vybrán quadrocopter. Splňuje všechny požadavky definované v typické misi použití. Přímý pohon vrtulí omezuje množství mechanických prvků a tím zvyšuje spolehlivost. Umožňuje kolmý start a přistání i vis. Absence mechanických částí umožňuje možnost přímého řízení jednotlivých motorů pomocí elektronických budičů (nejsou nutné servopohony). Výhodou jsou materiály o konstruování quadrocopterů dostupné z internetu.

3 PODOBNÉ PROJEKTY

Vývojem navigačních jednotek se zabývá mnoho firem (Draganflyer, Microdrones,...), které obvykle nezveřejňují konstrukční detaily. Vedle nich ale existují komunity vyvíjející open source řešení. V této kapitole bude přiblíženo několik těchto veřejně dostupných projektů. Na internetu bylo vyhledáváno pod hesly UAV, autopilot, NMEA (National Marine Electronics Association) parser, navi modul, quadrocopter, GPS.

3.1 NG UAVP

Jedná se o kvalitně zdokumentovaný projekt, který se zabývá vývojem moderního autonomního multicopteru. Řídící jednotka obsahuje hlavní mikrokontrolér ARM7 LPC2148 (60 MHz) a pomocné ATmega644P (20 MHz) a ATmega328P (20 MHz). Zdrojový kód řídicího software má více než 80000 řádků. Informace dostupné z [4].

3.2 Paparazzi

Velmi obsáhlý francouzský projekt. Veškerý software i hardware je poskytován jako open source, dostupný pod licencí GNU (GNU's Not Unix) GPL (General Public License). Technologie zahrnuje hardware a software pro UAV i pro pozemní stanici. Existuje několik variant hardwaru pro UAV. Jako hlavní řídicí mikrokontrolér je použit ARM7 (LPC2148) nebo CortexM3. Řídící aplikace pozemní stanice je vytvořena pro Ubuntu Linux OS. Informace jsou čerpány z [5].

3.3 Autopilot

Jedná se o projekt americké firmy Rotomotion, LLC [6]. Cílem je vytvořit autonomní UAV pro volný čas. Software a hardware je poskytován pod licencí GPL. Data publikovaná na internetu již nejsou aktuální (z 2003), přesto zde lze nalézt zajímavé informace. Hlavní řídicí mikrokontrolér využívá architekturu StrongARM. Jako pomocný je použit mikrokontrolér AVR ATmega. Informace jsou dostupné z [7].

3.4 MicroKopter

MicroKopter poskytuje zdrojové kódy a hardwarové detaily, nejedná se ale o svobodný software a jeho použití je omezeno pouze pro hardware výrobce. Microcopter se zabývá prodejem hotových řešení. Navigační a letový modul využívá mikrokontroléry architektury AVR ATmega. Na stránkách [8] lze nalézt velké množství informací a ukázek spolu s rozsáhlou dokumentací. V současné době patří mezi jedny z nejpopulárnějších výrobců quadrocopterů.

4 NAVIGACE A GPS

Pojmem navigace rozumíme vedení objektu po požadované dráze. Navigace doprovázela lidstvo odnepaměti. Zaujímal významné místo ve válkách a dopravě. První technické pomůcky využívané k navigaci byly sice primitivní, ale důmyslné. Například kamal, dřevěná destička s provázkem. Připomeňme nejvýraznější zlomy ve vývoji navigace. Nesporně zde patří vynález kompasu (4. stol. př.n.l.), astrolábu (poč. n. l.). Vynález chronometru (17. století), nahrazení astrolábu sextantem (18. stol.), Objev gyroskopu (1817- Johann Bohnenberg). Patentování inerciální navigace (1910 - Německo). Vynález radaru (1935 - Anglie). Bouřlivý vývoj rádiové navigace probíhal během druhé světové války. Vývoj GNSS (Global Navigation Satellite System) započal roku 1966, systém GPS byl aktivován v roce 1993. Až díky moderní elektrotechnice a vývoji technologie MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) bylo možné integrovat potřebné senzory a umožnit konstrukci samostatně se regulujícího létajícího modelu malých rozměrů.

Postupy využívané v navigaci můžeme rozdělit do čtyř skupin. Astronomická navigace, inerciální navigace, dead reckoning a pilotáž viz [9].

4.1 GPS – historický úvod

Objevy na poli elektromagnetismu (1887 – Heinrich Hertz objevuje elektromagnetické vlnění) vedly k prvním pokusům o navigaci objektů za využití elektromagnetických vln (1904 – navigace lodí v Německu). Roku 1930 byl v Německu zprovozněn radionavigační systém pro navádění letadel na přistání. První radar byl vytvořen roku 1935 v Anglii. Během druhé světové války došlo k prudkému vývoji rádiové navigace. Po válce se rozšiřuje i do civilního letectví. V šedesátých letech se začala radionavigace využívat v kosmu (vypuštění Sputniku). Roku 1964 byl zprovozněn družicový systém Transit určený pro lokalizaci objektů. NAVSTAR (Navigation Timing and Ranging Global Position System) GPS zahájil svou činnost v roce 1973, později přejmenován na GPS. Plně funkčnost nastala v roce 1994. Zrušením selektivní dostupnosti v roce 2000 došlo k rozšiřování této technologie mezi širokou veřejnost. Čerpáno z [10].

4.2 GPS – technický úvod

GPS je typ GNSS. Využívá síť 32 družic na oběžné dráze. GPS přijímače jsou pasivní a poloha je určena z rozdílné doby šíření signálu od družic k přijímači. Výsledná data jsou obvykle vztahována k matematickému modelu země WGS 84 (World Geodetic System 1984). WGS 84 je univerzální aproximace povrchu Země pomocí elipsoidu. Existují také speciální elipsoidy pro lokální použití.

Z podstaty GPS vyplývá, že navigace je možná pouze v otevřeném prostoru s výhledem na oblohu. Komplikace nastávají při použití ve městě, kde dochází k vícenásobným odrazům signálu a stínění budovami. Při vhodných podmínkách (přímá viditelnost) je možné dosáhnout přesnosti v řádu desítek metrů. Existují různé metody, které umožňují zpřesnění výstupu z GPS přijímače.

Dostupné přijímače lze rozdělit na civilní a vojenské. Vojenské přijímače dosahují vyšší přesnosti. Civilní mají několik omezení, která nedovolují zneužití ve zbraňových systémech.

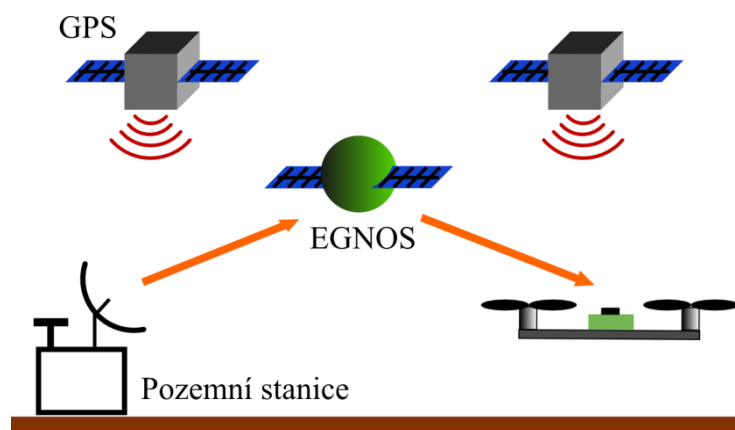
Podle [10] se jedná o:

- omezení výšky do 18 km (60 000 ft),
- omezení rychlosti do 515 m/s (1000 knots).

Vojenské přijímače využívají přenosu na dvou komunikačních frekvencích, což umožňuje potlačit chyby vznikající během průchodu signálu atmosférou.

4.3 Metody zpřesnění GPS

Metoda DGPS (Differential Global Position System) využívá další GPS přijímače, které jsou umístěny na pevných pozicích. To umožňuje generovat plošné korekce pro zpřesnění výstupu pohybujícího se GPS přijímače. Obvykle jsou korekce přenášeny ve formátu RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services). Existují dvě metody přenosu korekcí, pomocí geostacionárních satelitů (SBAS - Satellite Based Augmentation Systems) nebo pomocí pozemních sítí (GBAS - Ground Based Augmentation Systems). SBAS a GBAS poskytují plošné korekce platné pro definovanou oblast pokrytou pozemními korekčními stanicemi. Evropská realizace SBAS je nazývána EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service). GPS přijímač použitý v této práci podporuje systém EGNOS. Šíření korekce pomocí SBAS je znázorněno na obrázku 1.

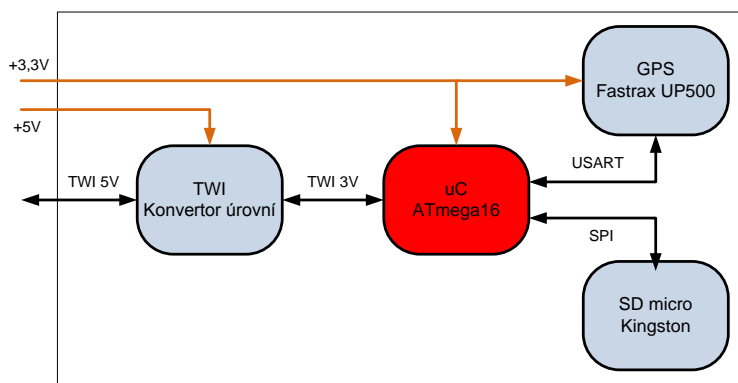


Obrázek 1: Princip DGPS SBAS

Další variantou DGPS je RTK (Real Time Kinematic), kdy je využito dvou GPS přijímačů. Jednoho stacionárního (base) a jednoho mobilního (rover). Stacionární přijímač určí dlouhodobým měřením svou přesnou polohu a poté pomocí rádiového spojení předává korekce mobilní stanici, která si upravuje aktuálně naměřená data.

5 NAVIGAČNÍ MODUL

Úkolem navigačního modulu je provádět zpracování dat z GPS přijímače a poskytovat navigační příkazy hlavní řídicí jednotce. Základ modulu tvoří mikrokontrolér ATmega16 a GPS modul Fastrax UP500. Jako rozšíření byla přidána čtečka microSD karet. Paměťová karta je určena k archivaci letových dat, případně k pro uložení seznamu bodů trasy. Celé zapojení využívá napětí 3,3V, ale protože hlavní řídicí jednotka pracuje s 5V obsahuje navigační modul konvertor úrovně pro TWI (Two Wires Interface) sběrnici. Blokové schéma navigačního modulu viz Obrázek 2.



Obrázek 2: Blokové schéma navigačního modulu

5.1 GPS modul

GPS OEM moduly jsou pasivní přijímače, které mohou využívat různých metod měření, více na stránkách [8]. Obsahují veškerou nutnou elektroniku a poskytují použitelný výstup bez dalších nároků na uživatele.

5.1.1 Výběr GPS modulu

Výběr GPS modulu byl podřízen několika faktorům. Základními hodnotícími kritérii byly velikost vzorkovací frekvence a přesnost měření pozice, dále bylo přihlíženo k hmotnosti, rozměrům, komunikačnímu protokolu a ceně. Limitujícím faktorem byla dostupnost. Vybíráno bylo pouze z nabídky českého trhu, kde je omezený sortiment OEM (Original Equipment Manufacturer) GPS modulů. Po předběžném výběru bylo rozhodováno mezi třemi typy: Leadtek LR9552, Fastrax UP500 a Orcam GPS02F5. Porovnání parametrů je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1: Porovnání parametrů GPS OEM modulů

Typ	LR9552	UP500	GPS02F5
Udávaná přesnost pozice	10m, 2D RMS ¹ 5 m	1,8 m CEP95 ²	3 m CEP50 ³
Přepočtená přesnost (CEP95)	4,15m	1,8m	6,2 m
Přesnost času	1 us	1 us	?
Výrobce	Leadtek	Fastrax	Orcam
Cena s DPH [CZK]	1450	864 (min 2 kusy)	1341
Chipset	SIRFstarIII	MTK MT3318	MTK MT3318
Napájení	3.6-5.5V (70 mA)	3 - 5,5 V (90 mW)	3 - 5,5 V (60 mW)
Komunikační protokol	NMEA 0183, SIRF Binary	NMEA 0183	NMEA 0183
Rozměry š x d x v [mm]	25 x 25 x 8,9	22 x 22 x 8	15,9 x 13,1 x 2,15
Startovací čas cold/warm/hot [s]	42/38/1	33/33/1	33/33/1
Komunikační sběrnice	RS232	RS232	2 x RS323
elipsoid	WGS-84	WGS84	WGS84
C/A kód	1.023 MHz chip rate	1.023 MHz chip rate	1.023 MHz chip rate
Počet kanálů	20	32	32
Obnovovací frekvence	1Hz	až 5 Hz	až 5Hz
Integrovaná záložní baterie	ano	ne, volitelné	ne
Diferenční korekce	WAAS	WAAS, EGNOS	SBAS, RTCM, WASS, ENGOS, MSAS
Integrovaná anténa	ano	ano	ne

Jako nejvhodnější byl vybrán modul Fastrax UP500. Hlavní výhodou oproti ostatním je přesnost pozice 1,8 m.

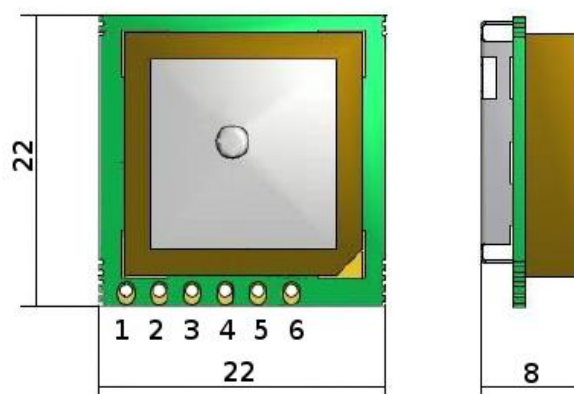
5.1.2 OEM GPS modul Fastrax UP500

UP500 je GPS modul s integrovanou anténou. Je schopný přijímat korekce systému EGNOS. Modul zajišťuje kompletní zpracování signálu od příjmu družicového vysílání až po výstup na sériovou linku ve formě ASCII (American Standard Code for Information Interchange) zpráv protokolu NMEA (National Marine Electronics Association). Rozložení pinů a geometrické rozměry jsou ukázány na obrázku 3.

¹ 2D RMS - 2D Root Mean Square

² CEP 95 – Circular Error Probable 95%

³ CEP50 - Circular Error Probable 50%



Obrázek 3: Rozložení pinů UP500, převzato z [11]

Význam jednotlivých pinů je uveden v Tabulce 2. Jsou využity všechny vývody, kromě pinu č. 6 PPS (Pulse Per Second). Tento pin slouží k výstupu přesného času v podobě impulzů o frekvenci 1Hz. Lze ho využít ke kalibraci přesného času. V navigačním modulu tato funkce není využita.

Tabulka 2: Význam pinů UP500, převzato z [11]

Pin	Jméno	I/O	Popis
1	RXD	I	UART ⁴ Port 0 asynchronní vstup
2	TXD	O	UART Port 0 asynchronní výstup
3	GND	-	Ground
4	VDD	I	Hlavní napájení
5	BU	I	Záložní napájení
6	PPS	O	1 Hz impulz

Modul je z výroby nastaven na rychlost sériové linky 9600 bps. Výstup tvoří ASCII věty protokolu NMEA. Jedná se o věty GGA (Global Positioning System Fix Data), RMC (Recommended Minimum Specific GNSS Data), GSV (Sattelites in view) a GSA (DOP and Active Sattelites). Vzorkovací frekvence je 1Hz. Změna konfigurace se provádí zasláním odpovídající příkazové NMEA věty GPS modulu. Pro snadné testování a seznámení se s možnostmi modulu poskytuje firma Fastrax uživatelský software GPS Workbench 4. Tento program umožňuje nastavení modulu spolu se zobrazením a archivací naměřených dat. Bližší popis NMEA protokolu a způsob změny nastavení modulu je uveden v kapitole 8.1.

⁴ UART – Universal Asynchronous Receiver / Transmitter

5.2 Mikrokontrolér

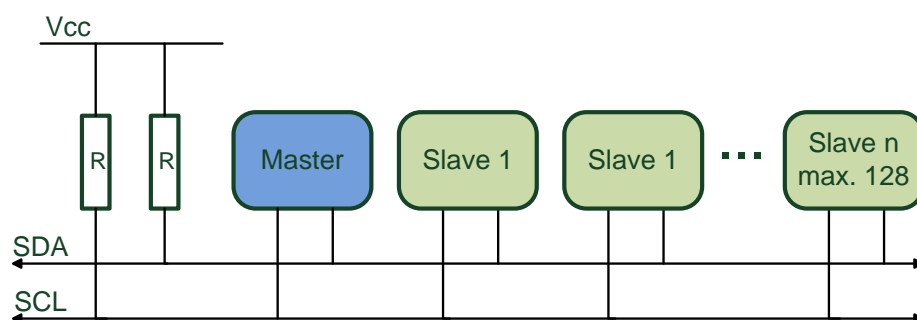
Použité periferie definují základní požadavky na mikrokontrolér. Komunikace s hlavní řídicí deskou je zajištěna pomocí TWI sběrnice. GPS modul využívá sériovou sběrnici a SD karta komunikuje pomocí rozhraní SPI. Mikrokontrolér musí disponovat dostatečnou Flash pamětí pro uložení programu. Předpokládá se využití obsáhlé knihovny pro obsluhu SD karty. Vhodný mikrokontrolér byl vybírán z řady mikrokontrolerů Atmel AVR ATmega. Po zvážení dostupnosti a po přihlédnutí k předchozím zkušenostem autora byl zvolen typ ATmega16.

Maximální výpočetní výkon mikrokontroléru zajišťuje taktovací frekvence 18,432 MHz. Frekvence je zvolena s ohledem na tabulku 71 v datasheetu [13] udávající chybovost přenosu dat na sériové lince.

V následujících kapitolách je uvedena specifikace použitých sběrnic. Mikrokontrolér ATmega16 obsahuje hardwarovou podporu všech uvedených sběrnic.

5.2.1 TWI

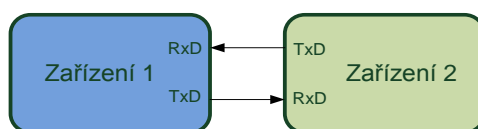
TWI je dvou vodičová adresovatelná sběrnice integrovaná do mikrokontrolerů firmy ATmel. Jedná se o obdobu sběrnice I²C (Inter Integrated Circuit) vyvinuté původně firmou Panasonic pro komunikaci periférií ve spotřební elektronice. Maximální přenosová frekvence je 400 kHz. Sběrnice pracuje se dvěma typy zařízení, typem master a slave. Typ master zahajuje a ukončuje přenos, adresuje zařízení slave, udává typ komunikace (zápis/čtení) a generuje hodiny. Zařízení slave je podřízeno příkazům zařízení master. Může pouze pozdržet potvrzovací zprávu, na kterou master čeká, a tím pozdržet komunikaci. Rozsah adresy je 7 bitů, což umožňuje připojit až 128 zařízení typu slave. Maximální komunikační frekvence je 400 kHz. Sběrnice je realizována dvěma vodiči, SCL (serial clock) přenáší hodinový signál a SDA (serial data) přenáší data. Každá z těchto vodičů je pull up rezistorem připojen k napájecímu napětí, aby byla zajištěna vysoká úroveň během klidového stavu. Ilustrační schéma TWI sběrnice je znázorněno na obrázku 4. Čerpáno z [13]. TWI sběrnice použitá v této práci používá dvě různé napěťové úrovně. Konvertor úrovní je popsán v kapitole 5.3.



Obrázek 4: Ilustrační schéma sběrnice TWI

5.2.2 USART

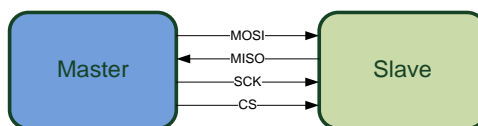
USART (Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter) je sériová sběrnice. Na rozdíl od TWI umožňuje mikrokontroléru komunikovat pouze s jedním zařízením. Umožňuje plně duplexní i poloduplexní přenos. Přenosová rychlost je odvozena z taktovací frekvence procesoru. Pro použitou taktovací frekvenci 18,432 MHz je maximální přenosová rychlost pro USART 2,304 Mbps. Datový paket obsahuje synchronizační start bit, data (5 až 9 bitů), jeden nebo dva stop bity a případně paritní bit. ATmega16 má hardwarově podporovaný USART, který zajišťuje režii přenosu. Výstup zařízení je označován TxD (Transmitted Data) a vstup RxD (Received Data). V této práci je pro komunikaci s GPS modulem využit plně duplexní asynchronní přenos. Grafické znázornění sběrnice je na obrázku 5.



Obrázek 5: Ilustrační schéma sběrnice USART

5.2.3 SPI

SPI (Serial Peripheral Interface) je vysokorychlostní synchronní sběrnici. Maximální přenosová frekvence pro Slave zařízení by neměla překročit čtvrtinu taktovací frekvence procesoru. Pro použitou taktovací frekvenci 18,432 MHz je maximální přenosová rychlost 4,608 MHz. Pro master zařízení je to polovina taktovací frekvence procesoru (9,216 MHz). Zařízení na sběrnici mohou být typu master nebo slave. Slave zařízení jsou vybírány pomocí signálu CS (Chip Select). Další použité signály jsou: CLK (Clock) pro taktování sběrnice, MISO (Master Input Slave Output) a MOSI (Master Output Slave Input). Propojení zařízení master – slave je ilustrováno na obrázku 6.

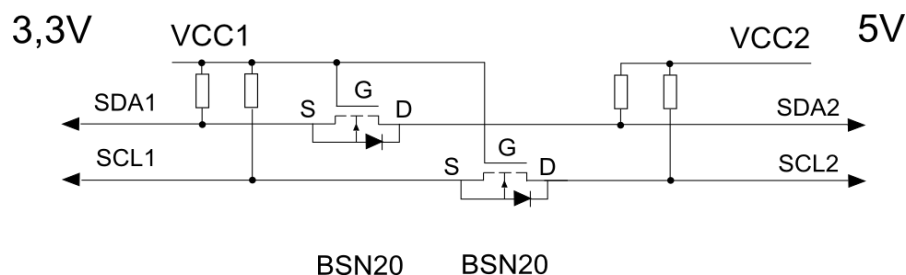


Obrázek 6: Ilustrační schéma sběrnice SPI

5.3 Konvertor napět'ových úrovní TWI sběrnice

Hlavní řídicí jednotka pracuje s napět'ovou úrovní logické jedničky 5V, ale navigační modul s 3,3V. Tento rozdíl vede k porušení přípustných tolerančních mezí pro dovolené

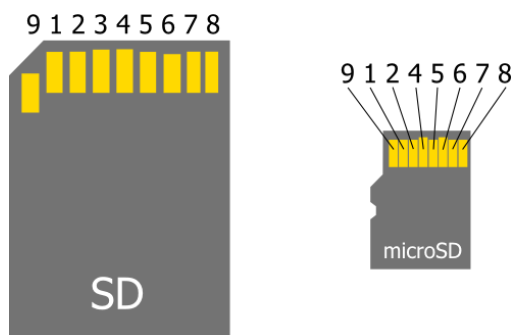
napětíové úrovně TWI sběrnice. Řešením je zařazení obousměrného konvertoru napětíových úrovní do komunikační cesty. Existují konvertory realizované ve formě integrovaného obvodu (např. TCA9406 od Texas Instruments), nebo je možné sestavit vlastní konvertor z diskretních součástek. Při vyhledávání vhodného zapojení bylo ve vyhledávači google.com použito hesel: I2C level shifter, I2C level translator, I2C convertor. Bylo použito zapojení z kapitoly 2.3 z [14], které využívá dvou MOS - FET tranzistorů BSN20. Schéma použitého zapojení je na obrázku 7.



Obrázek 7: Konvertor napětíových úrovní TWI sběrnice

5.4 Paměťová karta

Paměťová SD (Secure Digital) karta slouží pro archivaci letových dat a uložení seznamu s body trasy pro navigační účely. Pro maximální využití potenciálu SD karty tak, aby data uložená na kartě byla snadno přístupná z PC, je potřeba použít vhodný souborový systém. Nejčastěji používaný souborový systém v aplikacích s mikrokontroléry je FAT16 (File Allocation Table). Protože je obsluha SD karty a souborového systému poměrně složitá, byla vybrána vhodná knihovna pro práci s SD kartou, jedná se o knihovnu od Rolanda Riegela [15]. SD karty podporují dva komunikační módy, SD mód a SPI mód. Pro komunikaci s mikrokontrolérem je vhodný SPI mód. Jak název napovídá, využívá komunikaci pomocí SPI sběrnice (viz kapitola 5.2.3). Pro použití v quadcopteru je vhodnější použít menší a lehčí verzi SD karty microSD.



Obrázek 8: Rozložení pinů SD a microSD karty

Význam pinů SD a microSD karet jsou popsány v tabulce 3 a na obrázku 8. V zapojení navigačního modulu jsou využity piny č. 1, 2, 4, 5, 6 a 7.

Tabulka 3: Názvy pinů SD karty

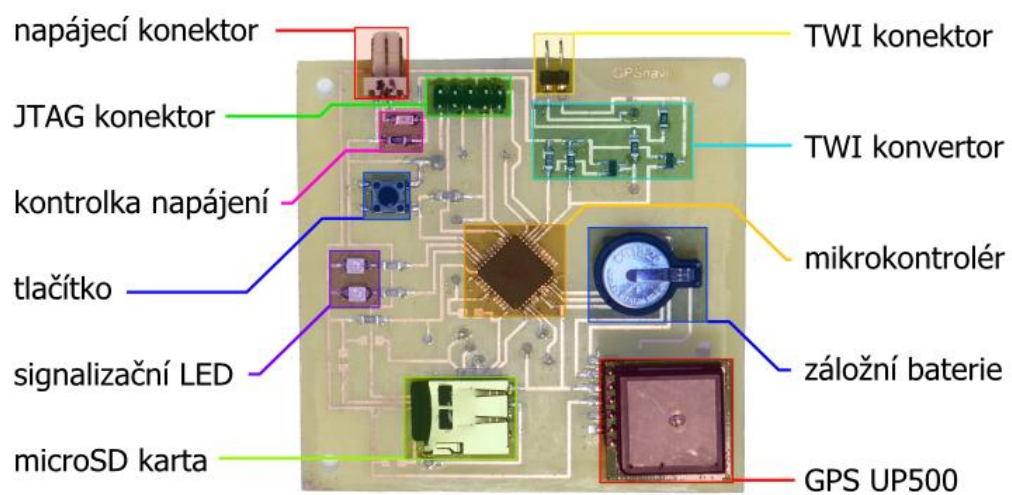
Pin SD	Název	SD mód	SPI mód
1	DAT3/CS	Data Line 3	Chip Select/Slave
2	CMD/DI	Command Line	Master Out Slave In (MOSI)
3	VSS1	Ground	Ground
4	VDD	Supply Voltage	Supply Voltage
5	CLK	Supply Voltage	Clock (SCK)
6	VSS2	Ground	Ground
7	DAT0/DO	Data Line 0	Master In Slave Out (MISO)
8	DAT1/RQ	Data Line 1	nepoužité
9	DAT2/NC	Data Line 2	nepoužité

5.5 Obvodové řešení a DPS

Zapojení používá dvě napájecí napětí. 3,3 V pro napájení mikrokontroléru, paměťové karty, LED diod a GPS modulu. 5V slouží pro napájení konvertoru úrovní pro TWI sběrnici. Na desce plošných spojů jsou vyvedeny 3 konektory. Napájecí konektor, JTAG konektor, konektor TWI sběrnice. Modul je navržen tak aby mohl být používán v různých režimech, proto je GPS přijímač připojen rozebiratelným spojem pomocí patice. To umožňuje jeho přepojení jak do navigačního, tak do testovacího modulu. Je možné propojit také sériové porty testovacího modulu a navigačního modulu bez GPS přijímače a testovat pomocí terminálu sériovou linku.

Deska plošných spojů je navržena jako jednostranná s drátovými propojkami. Návrh desky byl proveden v programu Eagle 5.9.0. Kromě standartních knihoven obsažených v Eaglu, byly použity dvě nově vytvořené knihovny pro GPS modul Fastrax UP500 a pro slot microSD karty. Technická dokumentace je uvedena v přílohách A, B a C. Plošný spoj byl realizován fotolitografickou cestou.

Během vývoje softwaru vyšly najevo některé nedostatky návrhu. Zejména malá taktovací frekvence interního oscilátoru mikrokontroléru, málo signalizačních LED diod a nevyvedení volných portů mikrokontroléru pro časovou analýzu programu na osciloskopu. Tyto nedostatky byly odstraněny “dobastlením” několika doplňujících prvků. Rozložení prvků na DPS je znázorněno na obrázku 9.



Obrázek 9: Navigační modul

6 POMOCNÉ OBVODY

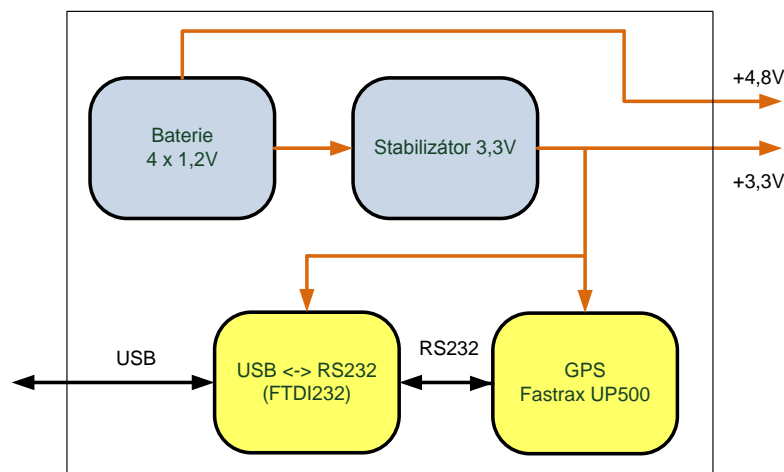
Vývoj navigačního modulu si vyžádal několik pomocných zapojení. Jedná se o napájecí a testovací modul a TWI <-> USB (Universal Serial Bus) převodník.

6.1 Testovací a napájecí modul

Testovací a napájecí modul slouží ke snadnému zprostředkování komunikace mezi GPS přijímačem a programem GPS Fastrax WorkBench 4. Dále zajišťuje napájení navigačního modulu v případě, že není připojen k hlavní řídicí desce.

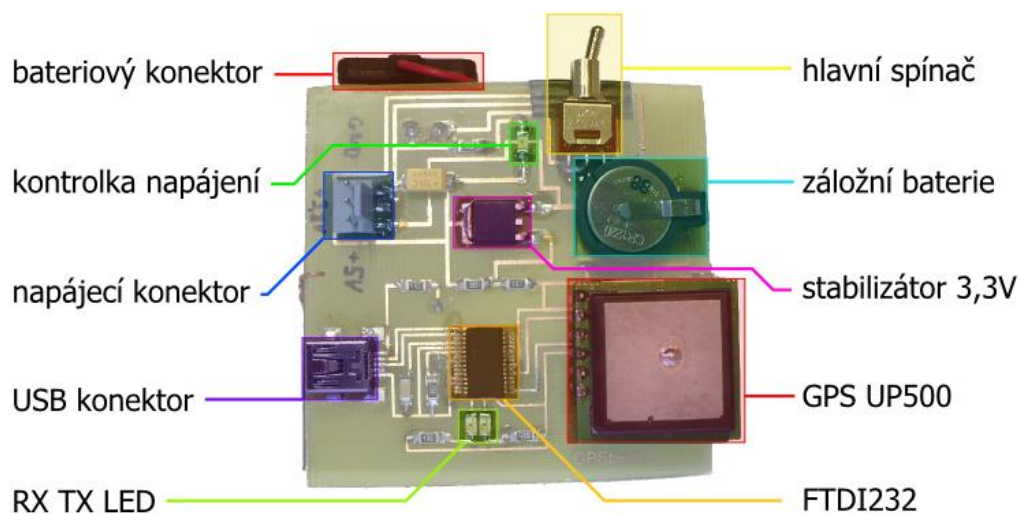
Program GPS WorkBench 4 slouží pro analýzu signálu z GPS přijímače UP500 a umožňuje jeho snadné nastavení a testování. Jako velmi užitečný se ukázal zejména při seznamování se s GPS přijímačem. Program komunikuje pomocí sběrnice RS-232. Protože použitý notebook nedisponuje tímto rozhraním, je využit obvod FTDI232, který po připojení do USB vytvoří virtuální sériový port. Dále také zajišťuje správné napěťové úrovně pro sériový port GPS přijímače. Připojení GPS přijímače je řešeno, stejně jako u navigačního modulu, rozebiratelně pomocí patice. Lze tedy variabilně měnit konfiguraci podle požadovaného testu.

Další funkcí je zajištění napájení navigačního modulu, pokud není připojen k hlavní řídicí desce, navigační modul vyžaduje dvě různé napěťové úrovně 3,3 V a 5 V. Aby byla zajištěna maximální mobilita zařízení, bylo zvoleno bateriové napájení. Napětí 4,8 V dodávané čtyřmi sériově spojenými akumulátory AAA je dostatečné pro napájení TWI sběrnice, rozdíl 0,2 V můžeme tedy zanedbat. Úroveň 3,3 V zajišťuje nastavitelný stabilizátor napětí ON-Semiconductor NCP1117-D. Blokové schéma testovacího a napájecího modulu je na obrázku 10.



Obrázek 10: Blokové schéma testovacího a napájecí modulu

Deska plošných spojů byla navržena obdobně jako u navigačního modulu v programu Eagle 5.9.0. Podklady pro výrobu DPS a osazení jsou v přílohách E, F a G. Realizace testovacího a napájecího modulu je na obrázku 11.



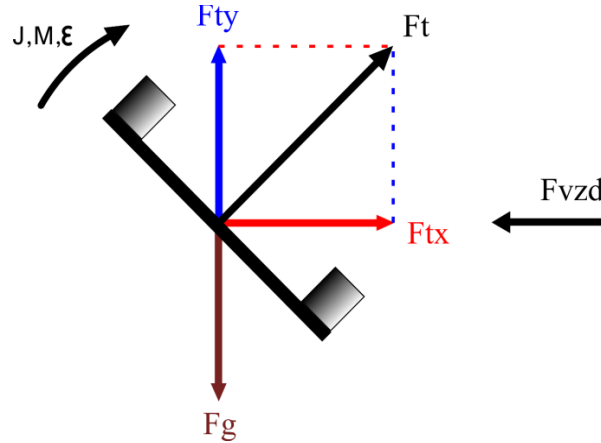
Obrázek 11: Testovací a napájecí modul

6.2 Převodník TWI <-> USB

Navigační modul má dva různé výstupy. Dvě LED a TWI sběrnici. LED nejsou pro efektivní analýzu chování dostatečné, vizualizace dat z TWI sběrnice je tedy velmi důležitá. Použitá metoda využívá další mikrokontrolér ATmega16, který funguje jako převodník TWI -> USART. Dále jsou upraveny napěťové úrovně sériové linky pomocí obvodu MAX232 a nakonec je zařazen komerčně dostupný převodník RS-232<->USB založený na čipu FTDI, Delock 61460. Zapojení je realizováno na kontaktním poli, viz příloha H.

7 SIMULACE POHYBU QUADROPTERU

Během letu na quadcopter působí několik zásadních vlivů (obrázek 12). Abychom mohli simulovat pohyb quadcopteru, je nutné tyto vlivy matematicky popsat.



Obrázek 12: Fyzikální představa quadcopteru

Nejvýrazněji na pohyb působí odpor prostředí. Je popsán vzorcem (1).

$$F_{vzd} = Cx * \frac{1}{2} * \rho * v^2 * S \quad (1)$$

F_{vzd} – odporová síla vznikající třením o vzduch [N]

Cx – součinitel odporu prostředí [-]

S – plocha předmětu [m^2]

ρ – hustota vzduchu [kg/m^3]

v – rychlost pohybu [m/s]

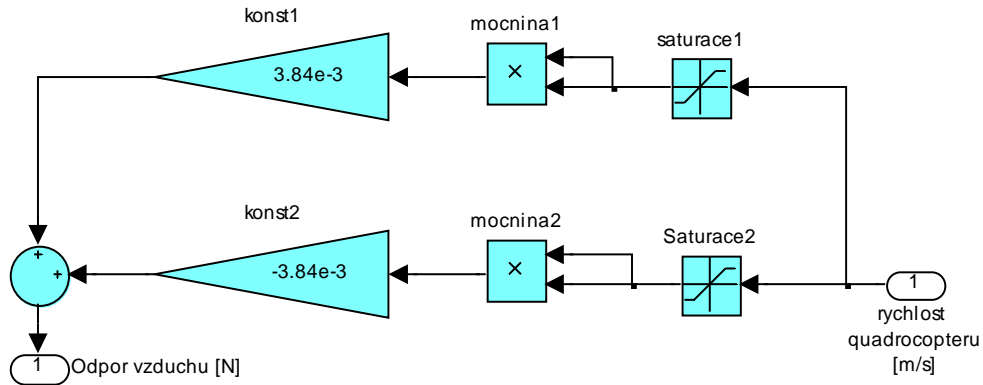
Dosažením parametrů prostředí a quadcopteru získáme:

$$F_{vzd} = 0,6 * \frac{1}{2} * 1,28 * v^2 * 0,01 \quad (2)$$

Většina proměnných je pro konkrétní prostředí a objekt konstantní. Jediná měnící se veličina je rychlost. Jak ukazuje (3), odpor prostředí se bude měnit s druhou mocninou rychlosti. Tato nelinearita ovlivní zejména postup návrhu a typ regulátoru.

$$F_{vzd} = 3,84 * 10^{-3} * v^2 \quad (3)$$

Realizaci této závislosti v prostředí Simulink ukazuje obrázek 13. Protože odporová síla působí vždy proti směru pohybu objektu, bylo nutné použít dvě větve pro kladnou a zápornou část.



Obrázek 13: Simulační schéma odporu prostředí

Efektivní síla E_{ef} , která způsobuje dopředný pohyb, odpovídá rozdílu složky tahu motorů ve směru letu F_{tx} a odporu prostředí podle (4). Je tedy zřejmé, že v okamžiku, kdy dojde k vyrovnaní těchto sil, bude se quadcopter pohybovat konstantní rychlostí.

$$F_{ef} = F_{tx} - F_{vzd} \quad (4)$$

F_{ef} – efektivní síla [N], síla, vyvolávající dopředné zrychlení quadcopteru

F_{tx} – dopředná složka tahu motorů [N]

F_{vzd} – odporová síla vznikající třením vzduchu [N]

Mechanismus změny velikosti dopředné tahové složky F_{tx} spočívá ve změně natočení celého modelu. Tato rotace ukazuje další hlavní vliv, a to setrvačnost hmoty quadcopteru během rotace. Tato setrvačnost ovlivňuje rychlost reakce na žádanou změnu dopředného tahu, neboli změnu natočení quadcopteru. Toto lze popsat rovnicí úhlového zrychlení (5)

$$\varepsilon = \frac{M}{J} \quad (5)$$

ε – úhlové zrychlení [$^\circ/s^2$]

J – moment setrvačnosti [kg/m^2], daný konstrukcí

M – moment síly [Nm], moment vyvinutý změnou tahů motorů

Moment setrvačnosti quadcopteru lze spočítat jako součet momentu setrvačnosti tyče a momentu setrvačnosti obruče podle (6).

$$J = \frac{1}{12} m_t * l^2 + m_m * r^2 \quad (6)$$

J – moment setrvačnosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

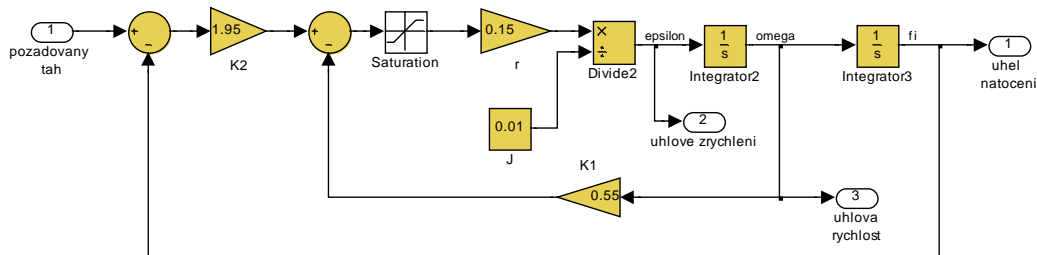
m_t – hmotnost tyče [kg]

l – délka tyče [m]

m_m – hmotnost obruče, v případě quadcopteru motorů [kg]

r – poloměr obruče [m]

Úhel natočení modelu musí být samostatně regulován. Problematikou návrhu regulátoru pro regulaci natočení se zabývá práce [2]. Regulátor navržený v této práci je využit v simulačním schématu pro regulaci náklonu (obrázek 14).



Obrázek 14: Simulační schéma regulace náklonu

Posledním významným vlivem je rozklad tahu motorů během natočení modelu. Aby se mohl model pohybovat v konstantní letové hladině, musí platit podmínka (7), kdy se rovná vertikální složka tahu motorů F_{ty} a tíhová síla F_g .

$$F_{ty} = F_g \quad (7)$$

F_g – tíhová síla [N], viz (8)

F_{ty} – vertikální složka tahu motorů [N]

$$F_g = m * g \quad (8)$$

m – hmotnost [kg]

g – gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

Vyjádříme tah motorů F_t v jednotlivých složkách F_{tx} (9) F_{ty} (10).

$$F_{tx} = F_t * \sin \alpha \quad (9)$$

$$F_{ty} = F_t * \cos \alpha \quad (10)$$

α – úhel natočení quadrocopteru [°]

F_{ty} – vertikální složka tahu motorů [N]

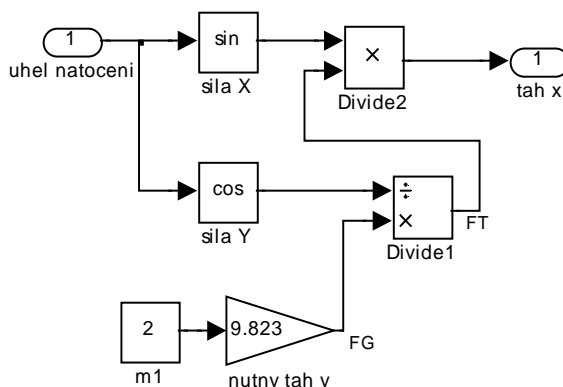
F_{tx} – horizontální složka tahu motorů [N]

F_t – výsledný tah motorů [N]

Nyní dosadíme podle podmínky (7) F_g za F_{ty} a po úpravě dostaneme vzorec pro výpočet celkového tahu motorů F_t po změně náklonu.

$$F_t = \frac{F_g}{\cos \alpha} \quad (11)$$

Nakonec vypočítáme dopředný tah podle (9). Simulační schéma členu konstantní letové hladiny je znázorněno na obrázku 15.



Obrázek 15: Simulační schéma tahu motorů při změně natočení

Navržená simulace znázorňuje pouze pohyb v jedné ose. Byla zanedbána změna plochy vystavené proudění vzduchu při změně natočení, protože je zanedbatelná. Hlavním záměrem je simulovat chování systému pro účely návrhu regulátoru polohy v globální souřadné soustavě.

7.1 Eliminace sférických souřadnic

Quadrocopter se nebude pohybovat na velké vzdálenosti, ale pouze v blízkém okolí obsluhy (okruh v řádu stovek metrů). To umožňuje zavést zjednodušení, kdy lze

sférické zeměpisné souřadnice považovat v malém okolí za souřadnice rovinné. Tímto zjednodušením vzniká chyba, kdy se dráha o délce 1km na povrchu země jeví stejná jako ve výšce 1km nad zemí, ale ve výšce 1km ve skutečnosti měří o 16cm více (12). Vzhledem k přesnosti GPS modulu 1,8m je tato nepřesnost zanedbatelná. Naopak byl ušetřen výpočetní výkon nutný na přepočty mezi souřadnicemi sférickými a kartézskými.

$$\Delta_{km} = \frac{o_{z1000}}{o_{z0}} - 1 = 16 \quad (12)$$

$$o_{z1000} = \pi(d_s + 2) = 40047.738$$

$$o_{z0} = \pi d_s = 40041,455$$

Δ_{km} – rozdíl délky drah se zadanou délkou 1km ve výšce 0 a 1000 m. n. m. [cm]

d_s – střední průměr Země $d_s = 12745,591\text{km}$

o_{z0} – obvod Země na povrchu [km]

o_{z1000} – délka kružnice ve výšce 1km nad Zemí [km]

8 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOLY

K přenosu dat dochází na dvou různých místech. Prvním místem je komunikace mezi mikrokontrolérem a hlavní řídicí deskou, kde je používána TWI sběrnice. Druhým místem je komunikace mezi GPS přijímačem a mikrokontrolérem, kde je využita sériová linka.

8.1 Komunikace GPS UP500 <-> MCU ATmega16

Výstup GPS přijímače je tvořen protokolem standardu NMEA0183. Tento protokol byl původně vytvořen pro použití v námořnictvu. Kompletní specifikace je placená, ale výrobce GPS modulu Firma Fastrax na vyžádání poskytuje specifikaci jím používaných vět.

NMEA protokol používá ASCII věty o délce maximálně 80 znaků. Každá věta se skládá z hlavičky začínající znakem '\$' následovaným typem věty. Tělo tvoří série dat oddělených čárkami. Každou větu ukončuje znak '*', za kterým následuje kontrolní součet. Můžeme rozlišit tři hlavní typy vět: věty výstupní (pro výstup z modulu), věty příkazovací (pro nastavení modulu) a dotazovací věty (pro kontrolu nastavení). Různé druhy výstupních vět, obsahují různé skupiny dat. Přijímač UP500 podporuje 14 různých typů vět. Bližší specifikace je uvedena v dokumentu [16] V navigačním modulu jsou využívány věty typu RMC a GGA, které poskytují všechna nutná data pro potřeby navigace.

GPS modul lze nakonfigurovat podle potřeb konkrétní aplikace. Lze nastavit požadované typy vět, jejich četnost a přenosovou rychlost sériové linky. K nastavení lze použít program GPS WorkBench 4, jakýkoliv terminál pracující se sériovou linkou nebo přímo řídicí mikrokontrolér. Jakékoliv změny se vrátí do továrního nastavení po odpojení napájení a záložní baterie. Je možné přepsat také tovární nastavení, tuto operaci lze však provést pouze 8krát, proto nebyla využita a řídicí program nastavuje přijímač vždy během inicializace navigačního modulu.

Ukázka vysvětlující význam věty RMC (převzato z [16]):

```
$GPRMC,114353.000,A,6016.3245,N,02458.3270,E,0.01,0.00,121009,,,A*69
$GPRMC,hhmmss.dd,S,xxmm.dddd,<N|S>,yyymm.dddd,<E|W>,s.s,h.h,ddmmyy,d.d,
<E|W>,M*hh<CR><LF>
```

Význam jednotlivých bloků dat je popsán v tabulce 4.

Tabulka 4: Význam NMEA věty RMC

hhmmss.dd	Čas vzorku. hh = hodiny, mm = minuty, ss = sekundy dd = desetinná část sekundy
S	Platnost vzorku A = platný V = neplatný
xxmm.dddd	Zeměpisná šířka xx = stupně mm = minuty dddd = desetinná část minuty
<N S>	Označení polokoule N = severní, S = jižní.
yyymm.dddd	Zeměpisná délka yyy = stupně mm = minuty dddd = desetinná část minuty
<E W>	Označení polokoule E = východní, W = západní
s.s	Rychlost v uzlech
h.h	Azimut, (kurz)
ddmmyy	Datu vzorku. dd = den mm = měsíc yy = rok
d.d	Magnetická deklinace
<E W>	Not supported
M	mód A=autonomní N= neplatná data

Ukázka uvedení modulu do pracovního nastavení:

"\$PMTK314,0,1,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0*28" – výstup pouze RMC a GGA věta

"\$PMTK300,200,0,0,0,0*2F" – změna opakovací periody na 200 ms

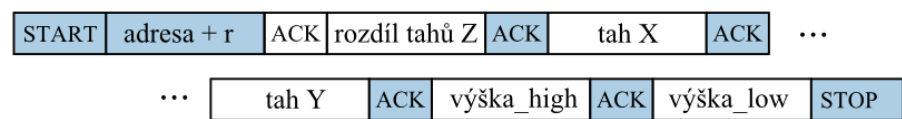
GPS modul je schopen příkazovou větu zpracovat pouze až po odeslání CR (Carriage return) na konci výstupní věty, proto je nutné vyčkat až na tento okamžik.

8.2 Komunikace navigační modul <-> hlavní jednotka

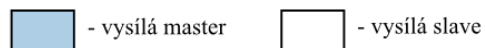
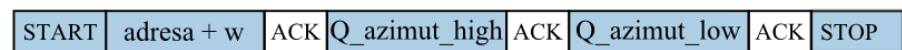
Výměna dat mezi navigačním modulem a hlavní řídicí jednotkou je realizována pomocí TWI sběrnice, kde hlavní jednotka představuje master zařízení a navigační modul slave zařízení. TWI má přesně definovaný komunikační protokol. Uživatel pouze zajišťuje správnou posloupnost přenášených dat.

Komunikaci zahajuje master modul vysláním start bitu a požadavkem na čtení dat. Poté slave modul zareaguje odesláním dat v pořadí podle obrázku 16 a). Po přijetí všech dat je komunikace ukončena stop bitem. Obdobně podle obrázku 16 b) předává hlavní jednotka data navigačnímu modulu.

a) slave -> master



b) master -> slave



Obrázek 16: Přenos dat po TWI

9 LETOVÉ STAVY

Pro navigaci modelu po požadované trajektorii je třeba definovat základní letové stavy. Byly definovány tyto tři základní stavy: vis, let z bodu A do B po přímé dráze a let z bodu A do B po kruhové dráze. Aby bylo možné tyto stavy implementovat do řídicího mikrokontroléru, je třeba je vhodně matematicky popsat. V praxi může vzniknout mnoho dílčích požadavků na jednotlivé stavy, ale pro základní experimenty byly použity nejjednodušší možné letové úlohy splňující definice jednotlivých letových stavů. Přestože je země v navigačním systému GPS aproximována elipsoidem WGS 84, byl díky malému operačnímu prostoru, v porovnání s velikostí Země, zanedbán vliv zaoblení zemského povrchu, viz kapitola 7.1. Řešení je tedy pro zjednodušení prováděno v kartézské soustavě souřadnic, kde jsou zeměpisná šířka a délka považovány za souřadnice x a y .

Základní problém pro jakýkoliv letový stav je určení natočení quadcopteru vůči severu (azimut). Azimut lze získat pomocí GPS, ale pouze pokud je model v pohybu. To je velmi omezující, proto je nutné, aby hlavní řídicí jednotka předávala navigačnímu modulu azimut získaný z absolutního senzoru, např. magnetometru.

V následujícím textu jsou rozlišovány tři druhy azimutů:

- azimut quadcopteru – reprezentuje natočení quadcopteru vůči severu
- azimut dráhy GPS – reprezentuje orientaci spojnice mezi dvěma posledně naměřenými body vůči severu
- azimut k bodu – reprezentuje orientaci spojnice mezi aktuální pozicí a žádanou pozicí vůči severu.

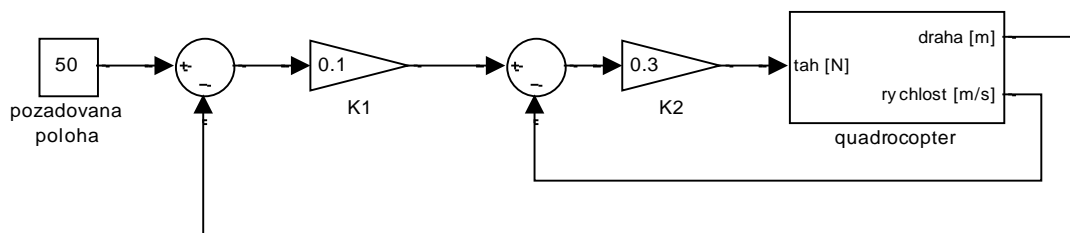
Je uvažováno, že regulace výšky letu je zajišťována nezávislým regulátorem. Jednotlivé letové stavy jsou tedy pro zjednodušení řešeny v rovině.

9.1 Vis

Uvažujeme - li nulový azimut quadcopteru, tak vstupními parametry této úlohy jsou žádaná a aktuální pozice. Každý z těchto bodů je definován souřadnicemi X a Y . Výstupem jsou tahy quadcopteru pro osy x a y . Regulaci polohy na nulovou ustálenou odchylku lze v tomto případě realizovat pomocí dvou regulátorů. Jeden generuje akční zásah v podobě tahu pro osu x , druhý pro osu y . Z toho vyplývá, že můžeme řešení dále zjednodušit pouze na jednu osu, protože regulátor pro druhou bude identický.

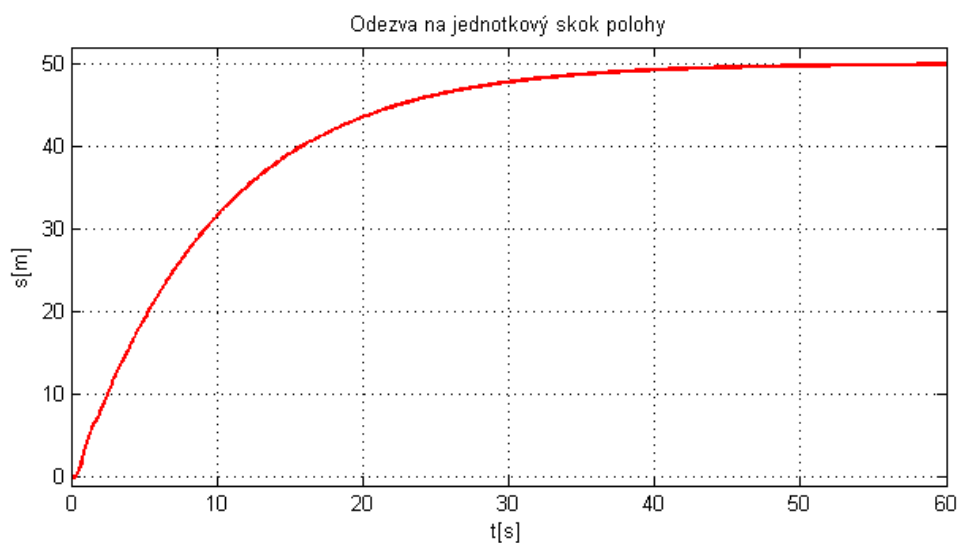
Pokud uvažujeme libovolný azimut quadcopteru, je třeba rozdělit úlohu výpočtu výsledných tahů pro osy quadcopteru x a y do dvou částí. V první části je vypočten vektor tahu stejně jako v předchozím odstavci. Poté je provedena transformace souřadnic z globálního souřadného systému do souřadného systému quadcopteru a následně jsou vypočteny tahy pro jednotlivé osy quadcopteru.

Systém má charakter servopohonu, proto je vhodné použít rozvětvený regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou, viz str. 151 v [18]. Protože je odpor vzduchu, podle (1), závislý na druhé mocnině rychlosti, jedná se o nelineární systém. To nás nutí navrhnout několik regulátorů pro různé rychlosti a za letu měnit parametry regulátorů podle okamžité rychlosti. Pomocí simulace popsané v kapitole 7 byl pokusně navržen rozvětvený regulační obvod zobrazený na obrázku 17, jehož parametry jsou zesílení $k_1 = 0,1$ a $k_2 = 0,3$ pro rychlost 0 - 7 m/s.



Obrázek 17: Rozvětvený regulační obvod regulátoru pozice

Odezvu systému na skokovou změnu žádané dráhy o velikosti 50 m zobrazuje obrázek 18.



Obrázek 18: Odezva systému na jednotkový skok žádané veličiny o velikosti 50 m

9.2 Let z bodu A do B po přímé dráze

Tato úloha je obdobná jako předchozí. Pro řešení lze využít dva přístupy. Můžeme použít stejný algoritmus jako v kapitole 9.1, kdy je udržován konstantní azimut quadrocopteru a změna polohy probíhá v osách x a y.

Větší vzdálenost mezi aktuální pozicí A a žádanou pozicí B dovoluje využít druhou metodu, kdy je definována dopředná rychlost a pevný směr tahu vůči quadrocopteru, viz obrázek 19.

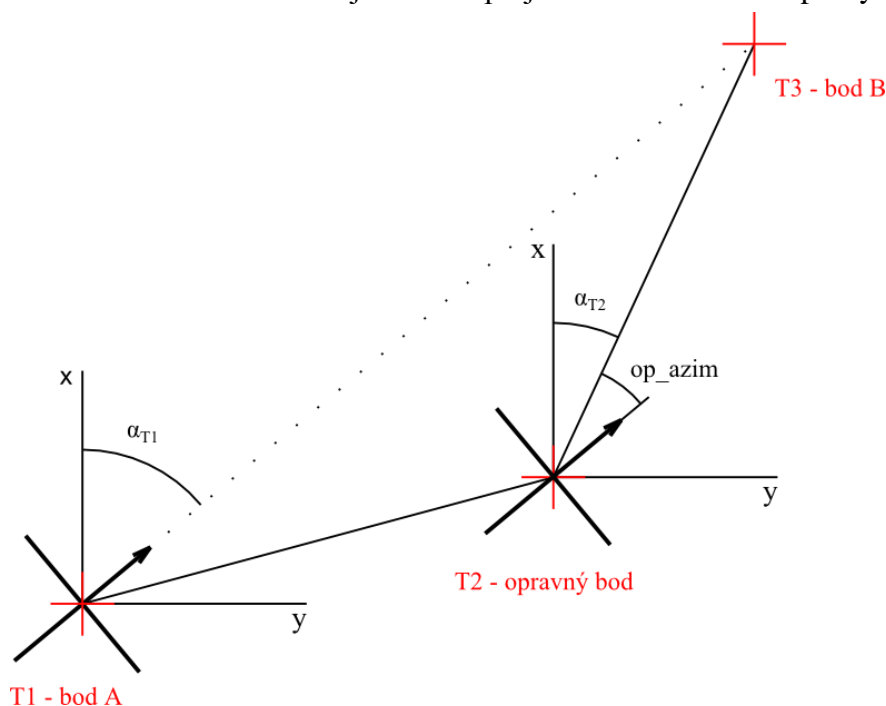
$$op_azim = \alpha_{T2} - \alpha_{T1} \quad (13)$$

α_{T1} – azimut quadcopteru v počátečním bodě A [°]

α_{T2} – azimut quadcopteru v opravném bodě [°]

op_azim – oprava azimutu [°]

Změna směru letu je vyvolána změnou azimutu quadcopteru. Výpočet opravy azimutu popisuje rovnice (13). Tato metoda je závislá na azimutu k bodu, který lze s přijatelnou přesností získat pouze, pokud je dostatečný rozdíl mezi aktuální a žádanou pozicí. Zjednodušeně lze tento postup popsat tak, že se quadcopter snaží držet čelem k cílovému bodu. Tuto metodu lze realizovat pomocí regulátoru rychlosti a regulátoru azimutu. Z toho vyplývá, že dalším vstupním parametrem je rychlost letu. Po přiblížení na malou vzdálenost k cílovému bodu je vhodné přejít na metodu vis z kapitoly 9.1.



Obrázek 19: Let z bodu A do B pomocí změny azimutu quadcopteru

α_{T1} – azimut quadcopteru v počátečním bodě A [°]

α_{T2} – azimut quadcopteru v opravném bodě [°]

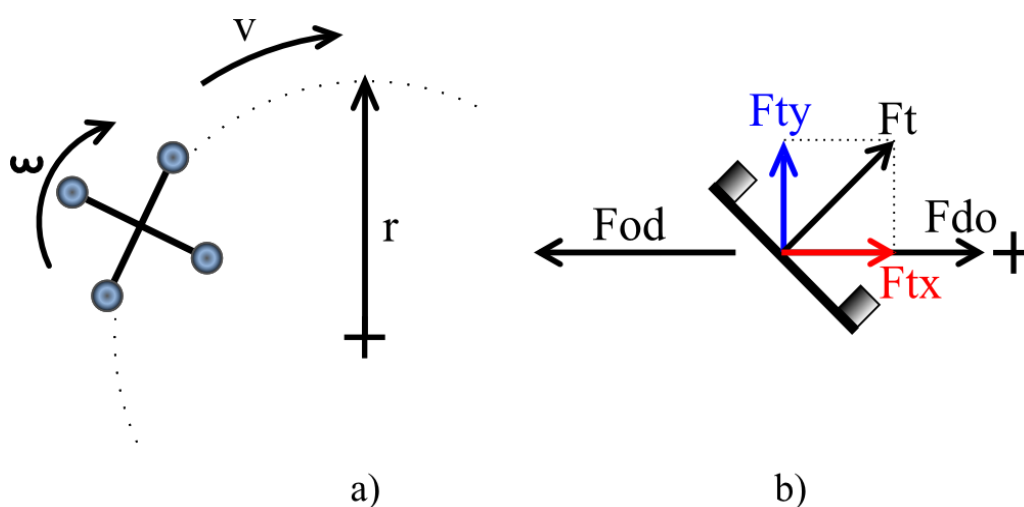
x, y – souřadnice globální souřadné soustavy [m]

op_azim – oprava azimutu [°]

9.3 Let po kruhové dráze

Letu po kruhové dráze lze dosáhnout několika způsoby. Pro velké poloměry můžeme definovat seznam bodů trasy popisující požadovanou kružnici a tyto body poté prolétávat obdobně jako v kapitole 9.2 pomocí některé z předchozích metod. Výpočet seznamů bodů trasy lze provést pomocí parametrické rovnice kružnice.

Pro malé poloměry, kdy není rozlišení GPS přijímače dostatečné, můžeme kružnici definovat dopřednou rychlostí quadcopteru a úhlovou rychlostí ω kolem svislé osy. V případě malého poloměru nelze zanedbat vliv odstředivé síly, kterou je nutné kompenzovat. Metodu pro malé poloměry znázorňuje obrázek 19.



Obrázek 20: a) Let po kruhové dráze, b) Kompenzace odstředivé síly

Vstupní data pro popis kruhové dráhy v kartézské souřadné soustavě jsou poloměr kružnice, střed kružnice, vstupní bod, výstupní bod a rychlost letu. Úhlová rychlost ω je dána rovnicí (13), velikost odstředivé síly je dána rovnicí (14).

$$s = 2\pi r, t = sv, t = \frac{2\pi}{\omega} \Rightarrow \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi rv \Rightarrow \omega = rv \quad (14)$$

s – dráha kompletního kruhu [°]

r – poloměr kruhu [m]

t – čas letu [s]

v – dopředná rychlost quadcopteru [m/s]

ω – úhlová rychlost otáčení quadcopteru kolem jeho svislé osy [rad/s]

$$F_{do} = \frac{m * v^2}{r} \quad (15)$$

m – hmotnost quadrocopteru [°]

v – rychlost quadrocopteru [m/s]

r – poloměr kruhové dráhy [m]

10 PROGRAMOVÁ ČÁST

Tato kapitola popisuje návrh a strukturu řídicího programu. Program je napsán v jazyce C. Důraz byl kladen na oddělení hardwarové abstrakční vrstvy od aplikační vrstvy.

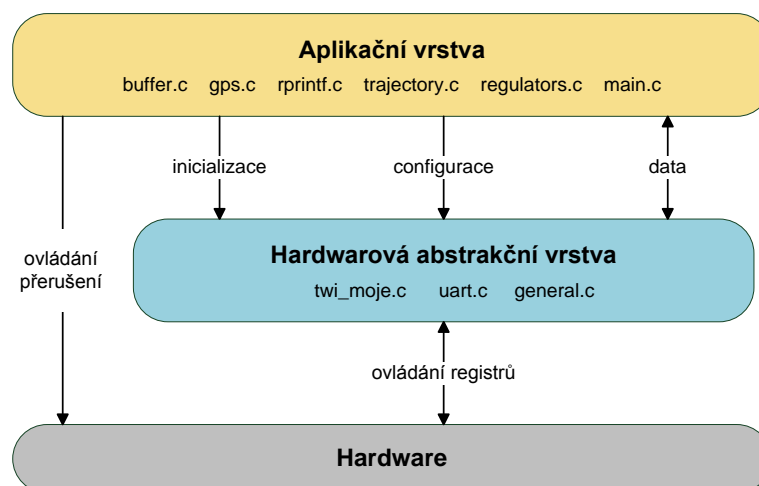
10.1 Vývojové nástroje

Základním vývojovým nástrojem je AVR studio 4. Jedná se o volně šiřitelný software poskytovaný firmou Atmel. AVR studio je ucelený nástroj pro vývoj programu a jeho naprogramování do mikrokontroléru. Pro práci s jazykem C využívá externí kompilátor WinAVR.

Pojítkem mezi vývojovým prostředím a cílovou aplikací je programátor AVR Dragon vyráběný firmou Atmel. Tento nástroj podporuje několik typů programování. V tomto konkrétním projektu je použito rozhraní JTAG. Hlavní výhodou tohoto rozhraní je možnost ladění aplikace přímo na čipu.

10.2 Struktura programu

Strukturu programu můžeme rozdělit do tří vrstev. Základ řešení tvoří hardware, nad ním je vystavěna hardwarová abstrakční vrstva, která odděluje hardware od vlastní aplikace. Tato abstrakční vrstva obsahuje knihovny pro obsluhu komunikačních rozhraní a jiných hardwarově orientovaných zařízení (tlačítek, LED signalizace). Do této vrstvy spadají knihovny `twi.h`, `usart.h` a `general.h`. Pokud by byl program převeden na jinou architekturu, abstrakční vrstva by musela být přizpůsobena této změně. Nad abstrakční vrstvou pracuje aplikační vrstva, která zajišťuje zpracování dat a vykonává navigační a regulační algoritmy. V případě změny architektury by v této vrstvě nemělo dojít k výrazným změnám. V aplikační vrstvě jsou obsaženy knihovny `trajectory.h`, `regulators.h` a také hlavní funkce `main`. Grafické znázornění struktury programu je na obrázku 20.

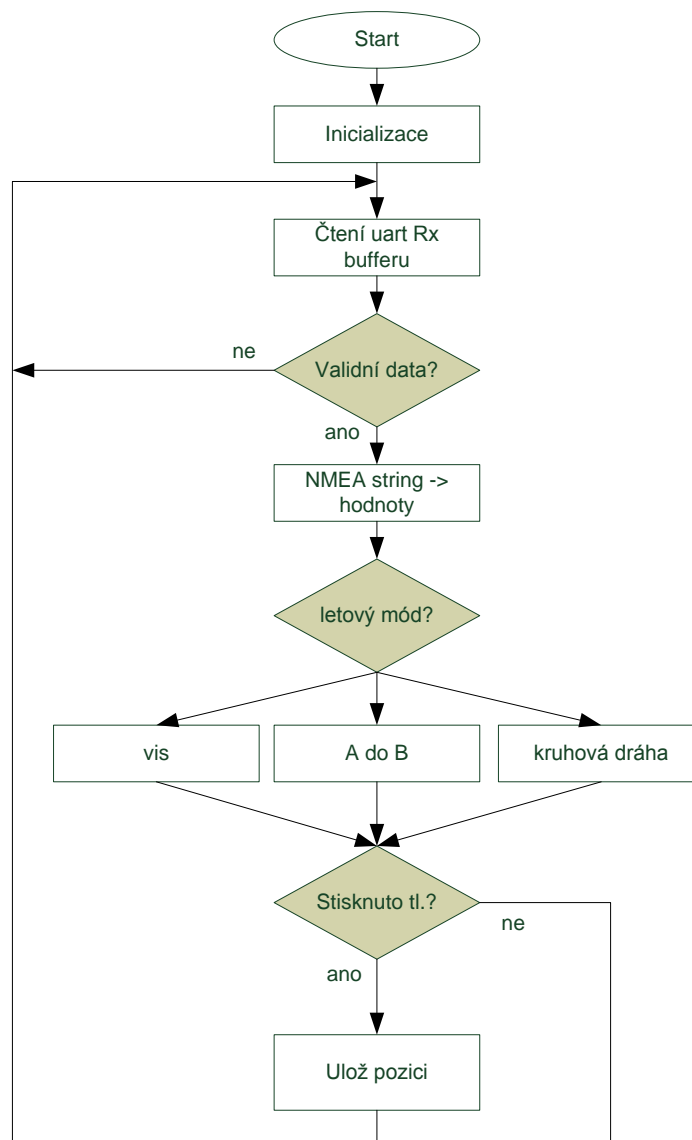


Obrázek 21: Struktura řídicího programu

V programu jsou využity funkce knihovny Procyon. Jedná se o velmi obsáhlou knihovnu pro obsluhu různorodých periférií mikrokontrolerů Atmel AVR. Informace o této knihovně lze nalézt na oficiálních stránkách [17]. V tomto projektu jsou využity soubory pro práci se sériovou linkou (`uart.h` a `uart.c`) a bufferem (`buffer.h` a `buffer.c`).

10.3 Průběh programu

Program periodicky vykonává nekonečnou smyčku, ve které jsou prováděny jednotlivé části řídicího algoritmu podle vývojového diagramu na obrázku 21. Opakovací frekvence regulačních smyček je závislá na vzorkovací frekvenci GPS přijímače. Ten umožňuje maximální vzorkovací frekvenci 5 Hz. Řídicí algoritmus je zobrazen na obrázku 22.



Obrázek 22: Vývojový diagram hlavního řídicího programu

Blok inicializace zajišťuje nastavení výchozích hodnot komunikačních sběrnic, parametrů GPS modulu, parametrů portů a inicializaci proměnných.

V následujícím bloku jsou načtena data z přijímacího kruhového bufferu sériové linky. Tím jsou připravena pro další zpracování.

Po kontrole validity dat podle příznaku ve větě RMC je program zastaven ve smyčce a čeká na platná data, nebo pokud jsou data platná, pokračuje do bloku převodu řetězců na číselné hodnoty.

V první části převodu je vždy podle známé pozice a počtu oddělovacích čárek nalezen požadovaný podřetězec. Ten je následně pomocí standardních funkcí pro práci s řetězci převeden na číselnou hodnotu vhodného typu.

Po výběru žádaného letového módu následuje jeho výpočet. Detaily řídicích algoritmů jednotlivých letových módů jsou popsány dále.

Jako poslední prvek nekonečné smyčky je uložení aktuální pozice při stisku tlačítka. To je využíváno pro nastavení cílového bodu trasy.

Komunikační sběrnice jsou obsluhovány nezávisle na hlavním programu pomocí přerušovacího systému.

Podprogram přerušení obsluhující příjem dat ze sériové linky zajišťuje správné nastavení ukazatelů na začátek a konec kruhového bufferu. Ten je dimenzovaný tak, aby vždy mohl držet všechny požadované komunikační věty.

Vysílání dat na sériovou linku je řešeno obdobně. Pro obsluhu bufferů a sériové linky jsou využity funkce knihovny [17].

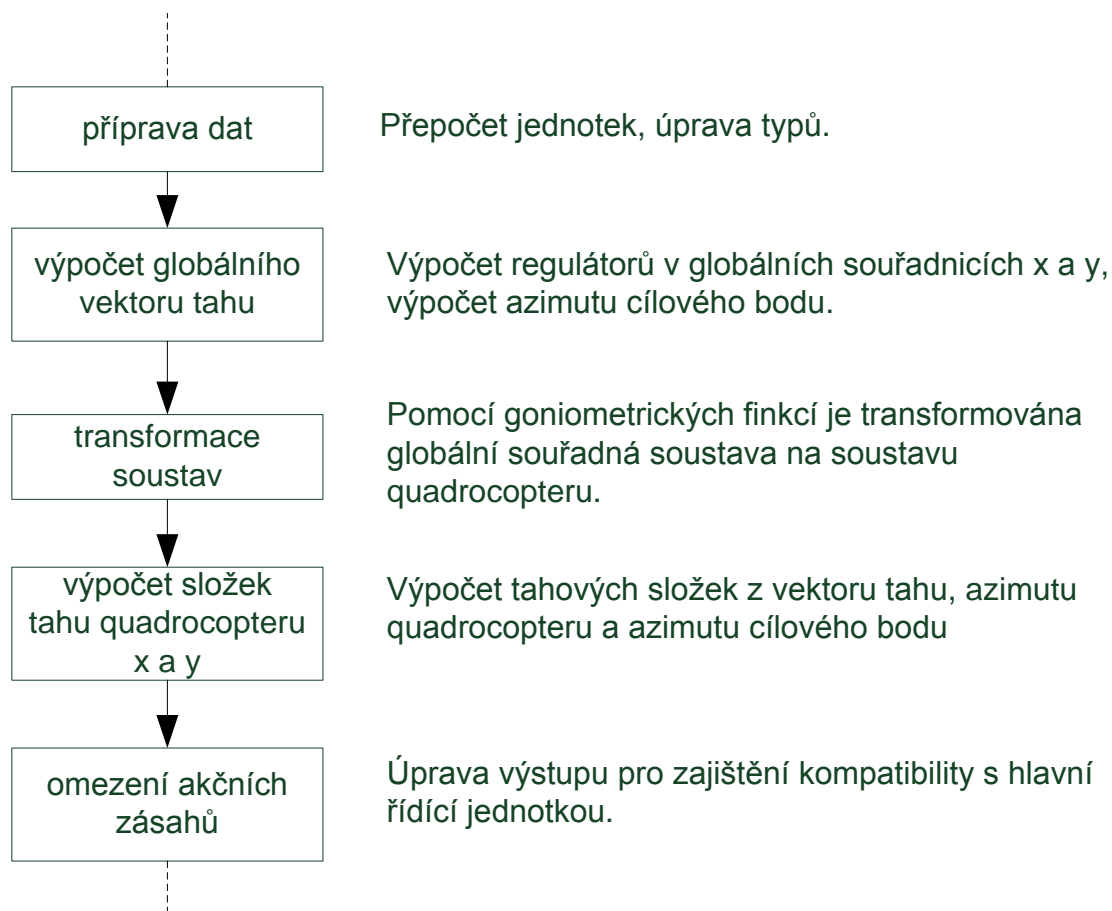
10.3.1 Programové řešení visu

Programová realizace visu vychází z kapitoly 9.1. Nejkomplikovanější část této úlohy je transformace mezi souřadnou soustavou země a souřadnou soustavou quadcopteru. Pro přepočítání mezi jednotlivými soustavami je využívána funkce `atan2()`. Ta pracuje s hodnotami $(-\pi, \pi)$. Počátek soustavy je umístěn na kladné polovině osy x . Hodnota natočení quadcopteru je však reprezentována jako azimut $\langle 0^\circ, 360^\circ)$ s počátkem umístěným na kladné polovině osy y . Transformace mezi těmito dvěma reprezentacemi natočení zajišťuje funkce `atan2azim()` a `azim2atan()`.

Po přípravě dat je vypočten globální vektor tahu pomocí regulátoru popsaného v kapitole 9.1 a Pythagorovy věty. Programová realizace regulátoru pro osu x :

```
tah_x_gl = (delta_x_glob * k2) - (speedX * k1);
```

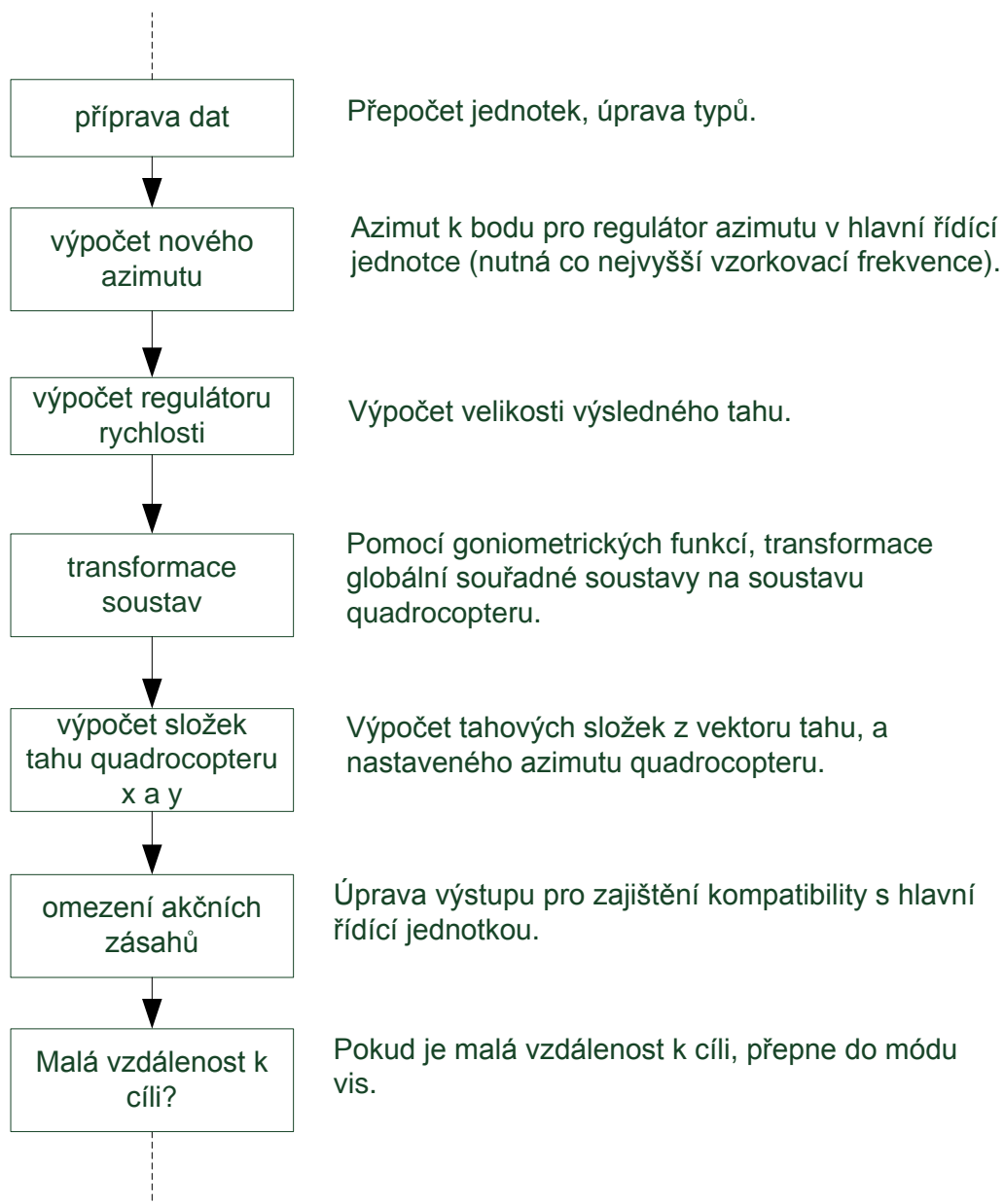
Dále je provedena transformace podle popisu výše, jsou vypočteny tahy quadcopteru v ose x a y a výstup je upraven na hodnoty kompatibilní s hlavní řídicí jednotkou. Algoritmus je znázorněn na obrázku 23.



Obrázek 23: Vývojový diagram algoritmu visu

10.3.2 Programové řešení letu z bodu A do B

Let z bodu A do B využívá stejný postup transformace mezi vztažnými soustavami. Rozdíl oproti předchozí kapitole je v regulovaných veličinách. Pro potřeby navigace na větší vzdálenost než malou, kde malá vzdálenost je taková, kdy již nelze spolehlivě měřit azimut quadropertu pomocí GPS (malá rychlost při přiblížení k cílovému bodu), je využíván regulátor azimutu quadropertu a regulátor rychlosti quadropertu. Stejně omezení platí i pro jakýkoliv jiný pohyb malou rychlostí a následné snížení rozlišení měření azimutu. Algoritmus letu z bodu A do B je na obrázku 24.

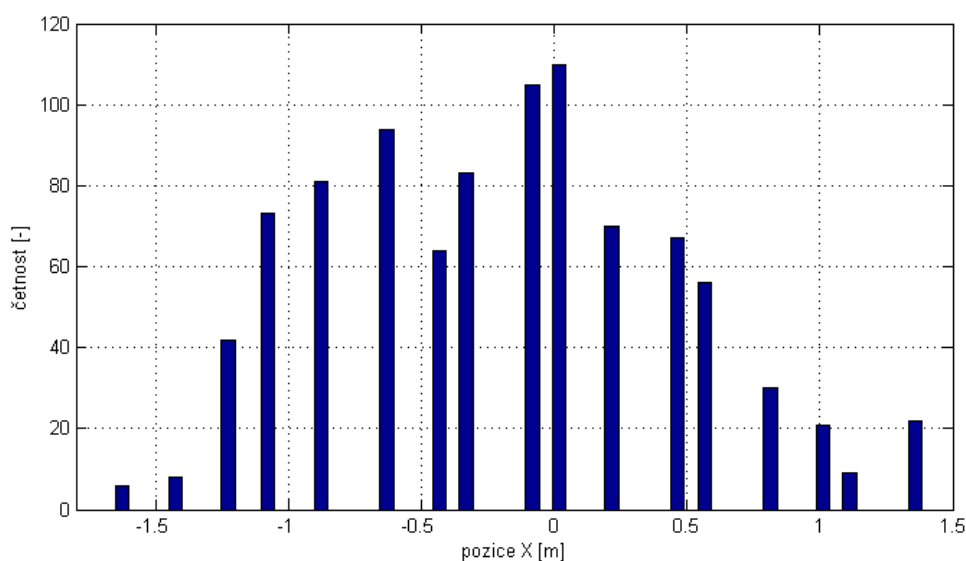


Obrázek 24: Vývojový diagram algoritmu letu z bodu A do B

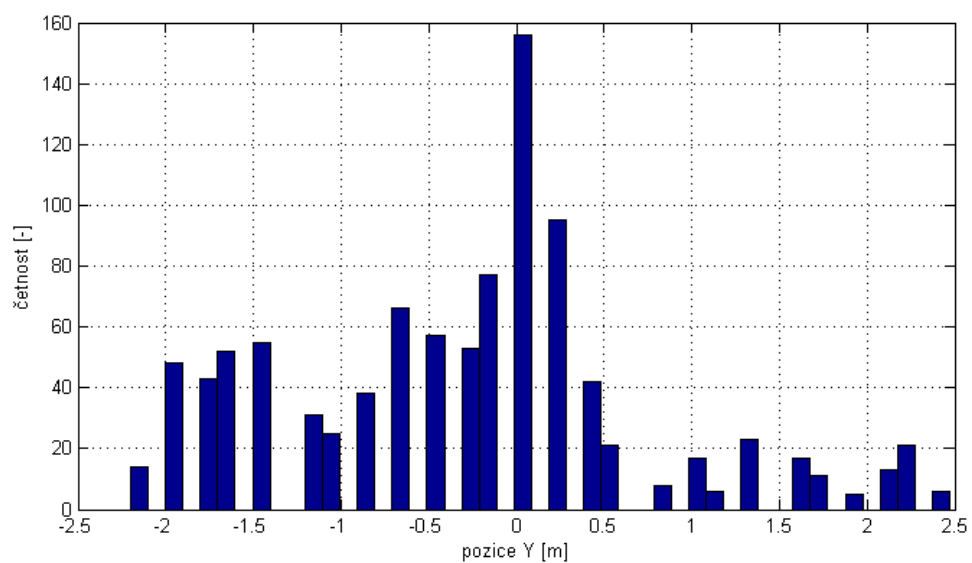
11 MĚŘENÍ

V rámci testování parametrů navigačního modulu bylo provedeno měření přesnosti GPS přijímače UP500. Byly měřeny tři základní veličiny: pozice na ose x, pozice na ose y a výška. Měření bylo provedeno na otevřeném prostranství bez rušivých objektů. GPS přijímač byl umístěn na nehybném ocelovém sloupku ve výšce 2m nad zemí. Obsluha se záznamníkem (notebook) byla vzdálena 5 m od přijímače. Propojení bylo realizováno pomocí USB sběrnice. Záznam byl realizován pomocí programu GPS workbench 4. Naměřená data byla zpracována v programu Matlab. Vykreslené histogramy představují četnost měření v jednotlivých bodech z 1000 vzorků. Hodnota 0 na ose x představuje bod s největší četností měření, který je považován za pravou polohu přijímací antény. Přijímač byl nastaven na vzorkovací frekvenci 5 Hz. Použitý obvod Země pro výpočet vzdálenosti je 40041,455 km.

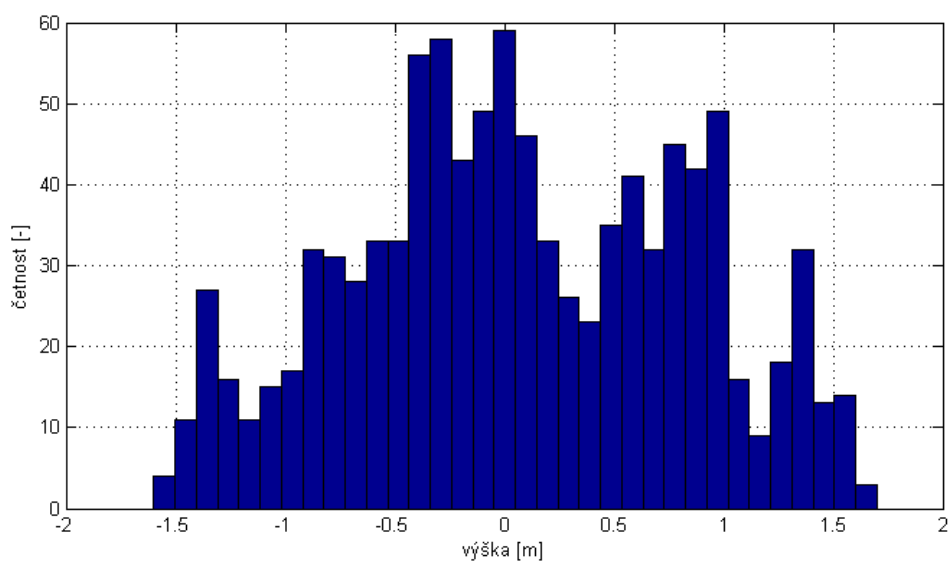
Výrobce udává přesnost pozice 1.8 m (CEP95) viz [11]. Výpočtem z naměřených hodnot byla zjištěna přesnost pozice 2.2 m (CEP95). Vzhledem k relativně malému vzorku měřených hodnot (1000 vzorků) a neznámým měřicím podmínkám výrobce můžeme prohlásit výrobcem uváděný údaj za pravdivý, pro podmínky popsané výše. Výsledné histogramy jsou vyobrazeny na obrázcích 24, 25 a 26.



Obrázek 25: Histogram pozice na ose x, 1000 vzorků, 5Hz



Obrázek 26: Histogram pozice na ose y, 1000 vzorků, 5Hz



Obrázek 27: Histogram výšky, 1000 vzorků, 5Hz

12 MOŽNOSTI VÝVOJE

V této kapitole jsou shrnuty poznatky z vývoje, zejména nápady na možná budoucí vylepšení. Navigační modul pracuje s mikrokontrolérem ATmega16. Ten se ukázal jako nedostačující z hlediska velikosti paměti programu (nemožnost využití knihovny pro obsluhu SD karty). Další nevýhodou je problematické ladění, způsobené přenosem dat zobrazovaných na PC přes řetězec několika převodníků (TWI – RS232 - USB), což komplikuje odhalení chyby. Proto by bylo vhodné použít mikrokontrolér s minimálně dvěma sériovými porty, jedním pro komunikaci s GPS přijímačem a druhým pro zobrazení dat na PC. Vhodným kandidátem je 32 bitový mikrokontrolér architektury ARM7 od firmy Texas Instruments LM3S6965. Další výhodou použití tohoto mikrokontroléru je možnost použití RTOS (Real Time Operation System), který by umožnil efektivní správu výpočetních zdrojů, souběžné vykonávání regulačních smyček a také by řešil správu přístupu k paměti. Jako vhodný se jeví open source projekt freeRTOS. Vzhledem k výpočtům s velkými čísly nabízí přechod na 32 bitovou architekturu zvýšení efektivity výpočtů.

Dalším vylepšením by mohlo být sloučení navigační jednotky a navigačního modulu tak, aby byl použit pouze jeden mikrokontrolér. To by umožňovalo sdružovat hodnoty naměřené jednotlivými senzory na jednom paměťovém místě, ke kterému by přistupovaly jednotlivé řídicí rutiny. Toto řešení eliminuje komunikační cestu mezi hlavní řídicí jednotkou a navigačním modulem, čímž lze zvýšit spolehlivost zařízení. Použití pouze jednoho mikrokontroléru a jedné společné DPS by také vedlo ke snížení hmotnosti.

Stávající přijímač UP500 je dostačující pro potřeby základního vývoje. Přesnost řešených navigačních úloh však bude vždy odpovídat přesnosti přijímače. Zajímavým řešením zvýšení přesnosti je použití RTK GPS přijímače.

Ke zlepšení navigačních vlastností by přispělo ošetření přechodových fází mezi jednotlivými letovými stavy, tak aby nedocházelo k nerealizovatelným situacím (např.: skoková změna směru).

13 ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout a zrealizovat navigační modul pro použití v modelu experimentálního létajícího prostředku nazývaného quadcopter. Byla navržena základní, modulární, hardwarová koncepce, složená ze samotného navigačního modulu, testovacího modulu a příslušenství v podobě převodníku TWI -> RS232 a převodníku RS232->USB. Tato koncepce umožňuje variabilní sestavení pro požadovaný úkol (měření, ladění programu). Základ navigačního modulu tvoří mikrokontrolér ATmega16 a GPS přijímač UP500.

Nedílnou součástí návrhu navigačního modulu je simulace chování quadcopteru. Jako simulační nástroj byl použit program Matlab, speciálně pak jeho nadstavba Simulink. Realizovaná simulace obsahuje všechny hlavní vlivy působící na pohyb quadcopteru v atmosféře a v gravitačním poli země. Rozbor fyzikálních závislostí odhalil několik významných poznatků. Zejména nelineární závislost odporové síly vzduchu na rychlosti pohybu quadcopteru. To komplikuje návrh regulátorů, kde je třeba použít několik různých sad parametrů pro různou aktuální rychlost quadcopteru.

Struktura řídicího softwaru vychází z předpokládané činnosti quadcopteru a použitých periférií. Základem je syntaktický analyzátor ASCII vět z GPS přijímače, algoritmy realizující výpočet letových stavů a obslužné rutiny komunikačních rozhraní. Hlavním úkolem navigačního modulu je řešení definovaných letových stavů, které umožňují navigaci quadcopteru po libovolné, žádané dráze. Byly definovány tři základní letové stavy: vis, let po přímé dráze a let po kruhové dráze.

Základním problémem všech letových stavů je transformace mezi globální souřadnou soustavou a souřadnou soustavou quadcopteru. Jednotlivé letové stavy jsou definovány závislostí několika stavových veličin, jejich žádanou hodnotu zajišťují příslušné regulátory.

Návrh regulačních smyček vychází ze simulace pohybu quadcopteru. Vzhledem k tomu, že regulace polohy quadcopteru má charakter servopohonu, byly experimentálně navrženy regulátory s pomocnou regulovanou veličinou.

Výsledkem práce je realizovaný navigační modul a jeho pomocné prostředky (převodníky, testovací a napájecí modul). Použitý mikrokontrolér se ukázal jako nedostatečný z hlediska malé paměti programu, což znemožnilo použití knihovny pro kontrolu paměťové karty.

Dalším úkolem bylo provést měření na navigačním modulu. Protože v době odevzdání této práce nebyl k dispozici dostupný quadcopter, nebylo možné testovat chování navržených algoritmů na reálném modelu. V rámci testování GPS přijímače UP500 byly proměřeny základní charakteristiky GPS přijímače. Naměřená přesnost pozice 2,2 m (CEP95) se blíží hodnotě 1,8 m (CEP95) udávané výrobcem.

Nezbytnou součástí přímo související s navigačním modulem je vývoj nového prototypu quadcopteru nazvaného Uranus Q2. U nové konstrukce je kladen důraz

na snížení hmotnosti a zvýšení tahu, což dovolí větší užitečné zatížení quadrocopteru. Nová konstrukce má delší ramena nosného kříže pro testování vlivu setrvačnosti hmoty motorů na chování stabilizace. Obrazová dokumentace quadrocopteru Uranus ve verzi Q1 je v příloze G, ve verzi Q2 v příloze H.

14 POUŽITÁ LITERATURA

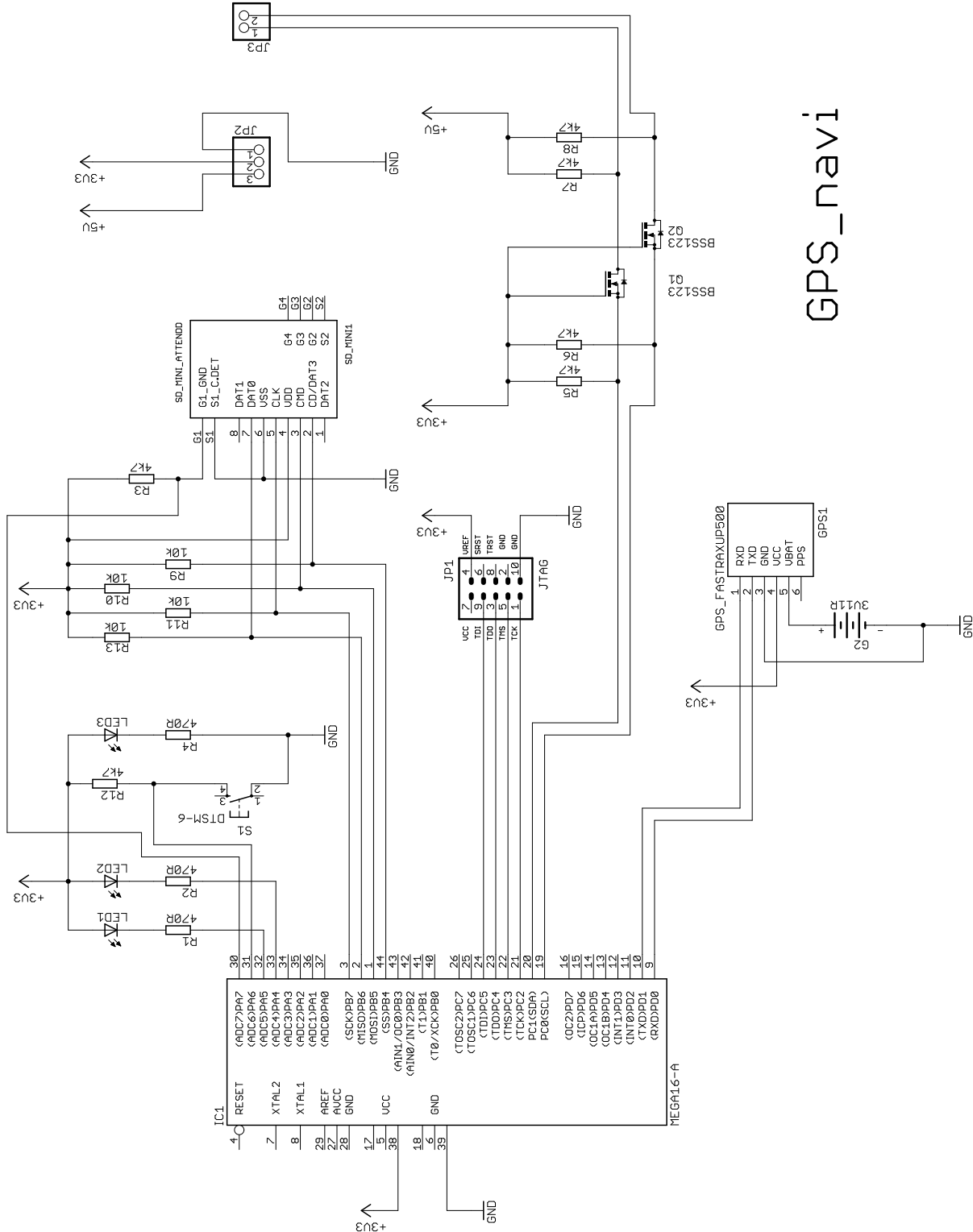
- [1] GÁBRLÍK, P. Quadrocopter – stabilizace a regulace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 75 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.
- [2] VOMOČIL, J. Quadrocopter – řídicí jednotka a komunikace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 64 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.
- [3] Využití bezpilotních létajících prostředků pro telemetrické účely. [on-line]. Dostupný z WWW: http://pennerscontacts.upce.cz/19_2010/Schwarz.pdf
- [4] Next Generation UAVP. NG UAVP [on-line]. Dostupný z WWW: <http://ng.uavp.ch/moin>
- [5] Paparazzi the free autopilot. Paparazzi [on-line]. Dostupný z WWW: http://paparazzi.enac.fr/wiki/Main_Page
- [6] Rotomotion. Rotomotion [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.rotomotion.com/index.html>
- [7] Autopilot: Do it yourself UAV. Autopilot [on-line]. Dostupný z WWW: <http://autopilot.sourceforge.net>
- [8] MikroKopter: MikroKopter [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.mikrokopter.com/ucwiki/en/MikroKopter>
- [9] Navigation history: The institute of navigation [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.ion.org/museum/>
- [10] Global Positioning System. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]: Wikipedia Foundation, Dostupné z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- [11] Datasheet Fastrax UP500. Fastrax [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.fastraxgps.com/showfile.cfm?guid=f01240ea-addc-4df3-bfcf-4037e0832892>
- [12] GPS Workbench 4. Fastrax [on-line]. Dostupný z WWW: <http://support.fastraxgps.com/downloads.html>
- [13] Datasheet ATmega16. Atmel [on-line], Dostupný z WWW: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2466.pdf
- [14] Bi – directional level shifter for I2C – bus and other systems. Philips semiconductors [on-line], Dostupný z WWW: <http://ics.nxp.com/support/documents/interface/pdf/an97055.pdf>
- [15] MMC/SD/SDHC card library. Roland Riegel [on-line], Dostupný z WWW: <http://www.roland-riegel.de/sd-reader/>
- [16] NMEA Manual for Fastrax IT500 Series GPS receivers. Fastrax [na vyžádání], Dostupný z support@fastraxgps.com

- [17] Procyon AVRlib Overview. Procyon AVRlib [on-line], Dostupný z <http://www.mil.ufl.edu/~chrisarnold/components/microcontrollerBoard/AVR/avrlib>
- [18] BLAHA, P., VAVŘÍN. P. Řízení a regulace 1. Brno: VUT Brno: 2005. 214 s.

Seznam příloh

Příloha A:	Schéma navigačního modulu
Příloha B:	Rozpiska součástí navigačního modulu
Příloha C:	Obrazec DPS navigačního modulu, osazovací plán
Příloha D:	Schéma testovacího modulu
Příloha E:	Rozpiska součástí testovacího modulu
Příloha F:	Obrazec DPS testovacího modulu, osazovací plán
Příloha G:	Fotodokumentace Uranos Q1
Příloha H:	Fotodokumentace Uranos Q2
Příloha I:	Datové CD

PŘÍLOHA A



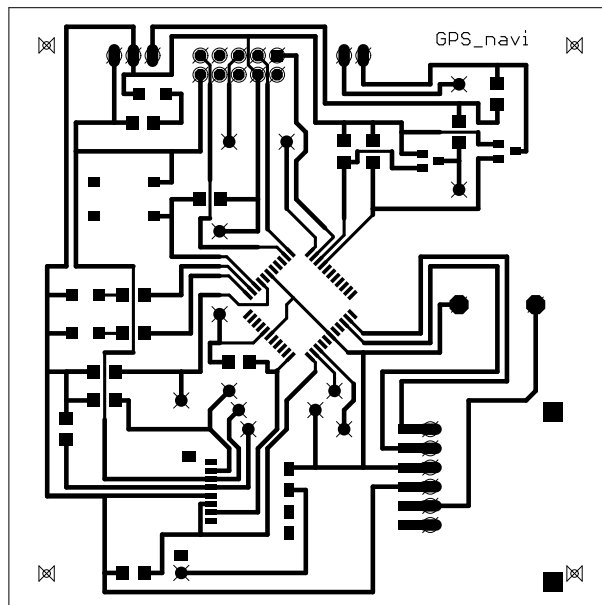
GPS_navi

PŘÍLOHA B

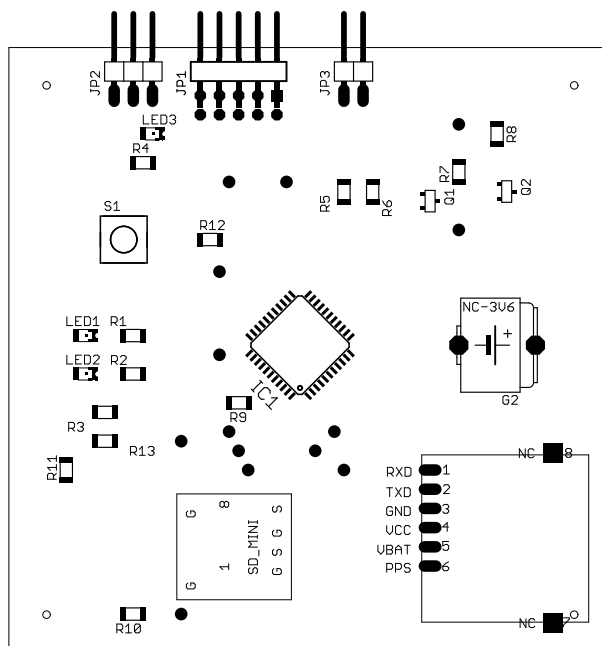
Součástka	Hodnota	Pouzdro
G2	3V11R	3V11R
GPS1	FastraxUP5000	UP500
IC1	ATmega16-A	TQP44
JP1	AVR-JTAG-10	JTAG 10
JP2	PINHD- 1X3	1x03/90
JP3	PINHD- 1X3	1x02/90
LED1	LED_1206	LED_1206
LED2	LED_1206	LED_1206
LED3	LED_1206	LED_1206
Q1	BSN20	SOT23
Q2	BSN20	SOT23
R1	470r	R1206
R2	470R	R1206
R3	4k7	R1206
R4	470R	R1206
R5	4k7	R1206
R6	4k7	R1206
R7	4k7	R1206
R8	4k7	R1206
R9	10k	R1206
R10	10k	R1206
R11	10k	R1206
R12	4k7	R1206
R13	10k	R1206
S1	DTSM-6	DTSM6
SD_MINI	SD_MINI	SD_MINI

PŘÍLOHA C, list 1/2

Obrazec DPS TOP

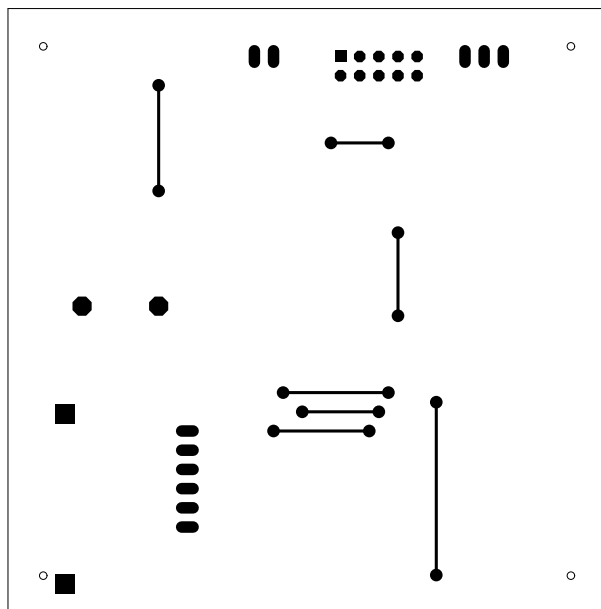


Osazovací plán top

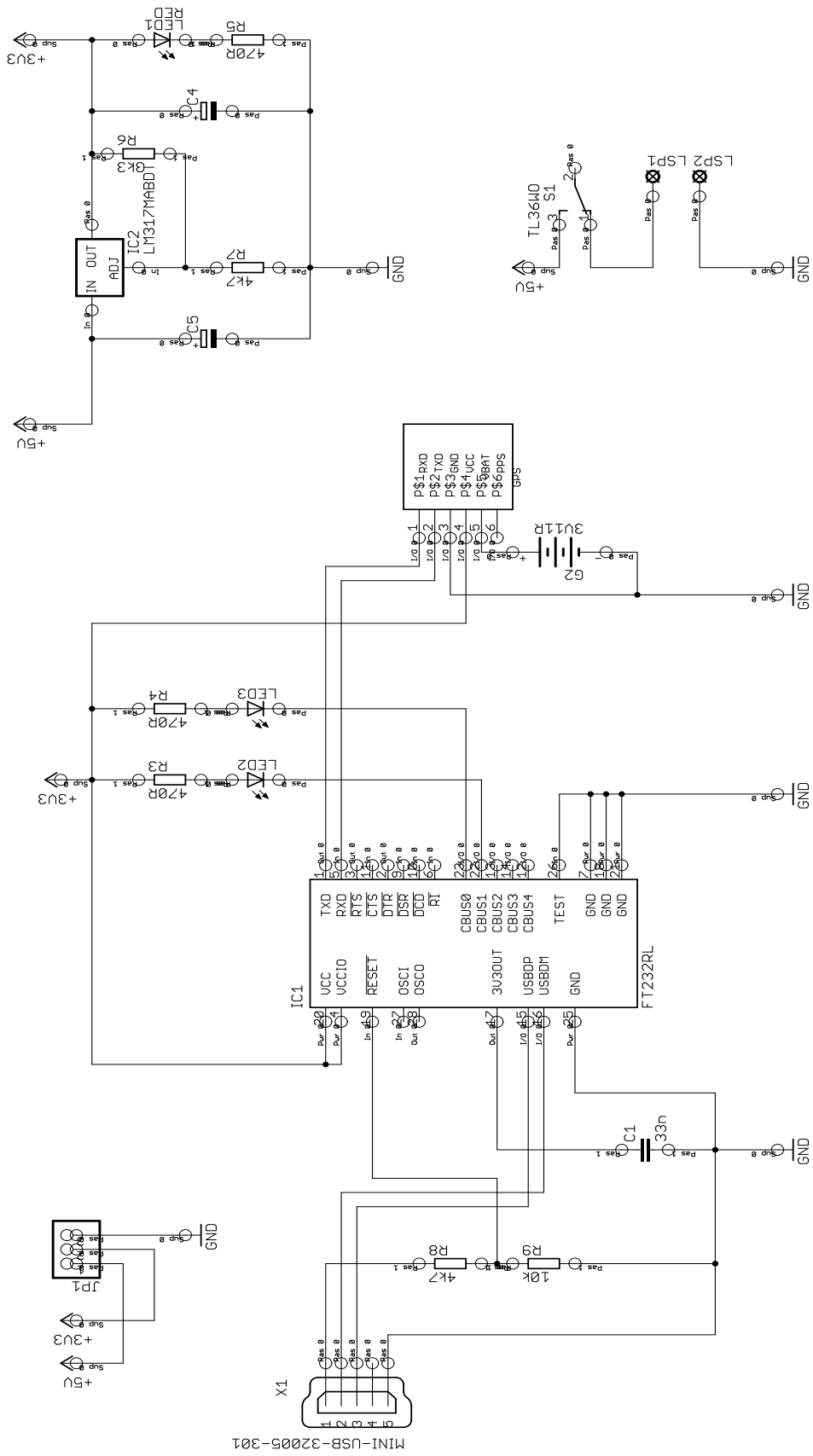


PŘÍLOHA C, list 2/2

Osazovací plán bottom



PŘÍLOHA D

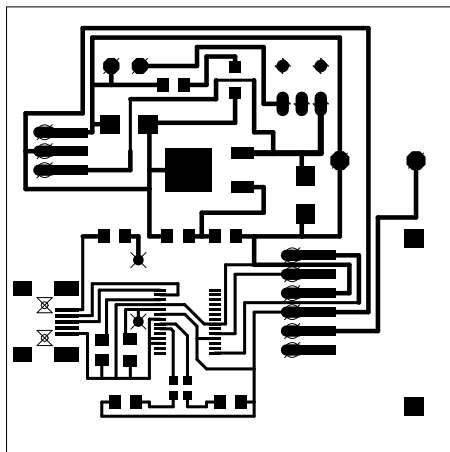


PŘÍLOHA E

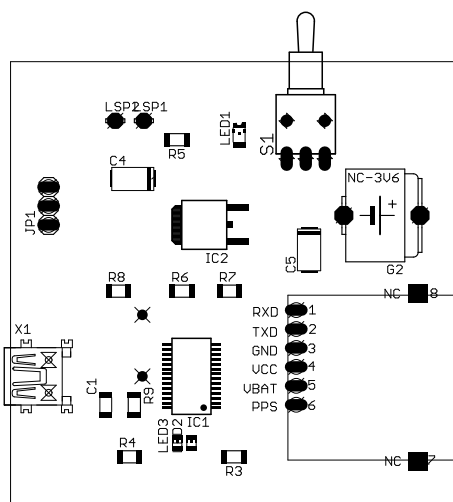
Součástka	Hodnota	Pouzdro
C1	3V11R	3V11R
C2	FastraxUP5000	UP500
C3	ATmega16-A	TQP44
G2	AVR-JTAG-10	JTAG 10
IC1	FT232RL	SSOP28
IC2	NCP1117	DPAK
JP1	PINHD- 1X3	1x03/90
LED1	LED_1206	LED_1206
LED2	LED_1206	LED_1206
LED3	LED_1206	SOT23
LSP1	BSN20	SOT23
LSP2	470r	R1206
R1	470R	R1206
R2	4k7	R1206
R3	470R	R1206
R4	4k7	R1206
R5	4k7	R1206
R6	4k7	R1206
R7	4k7	R1206
S1	TL36WO	TL36WO
GPS1	FastraxUP5000	UP500
X1	MINI-USB	MINI-USB-B

PŘÍLOHA F

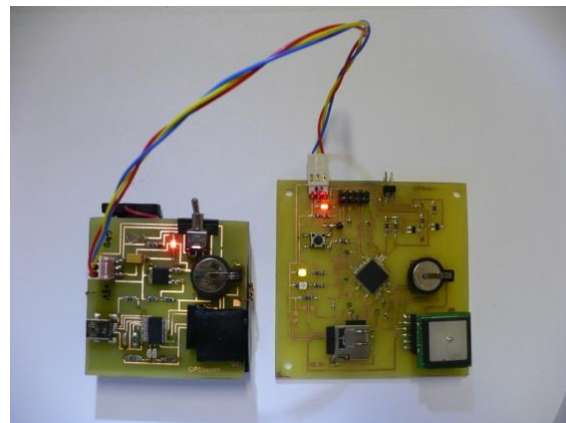
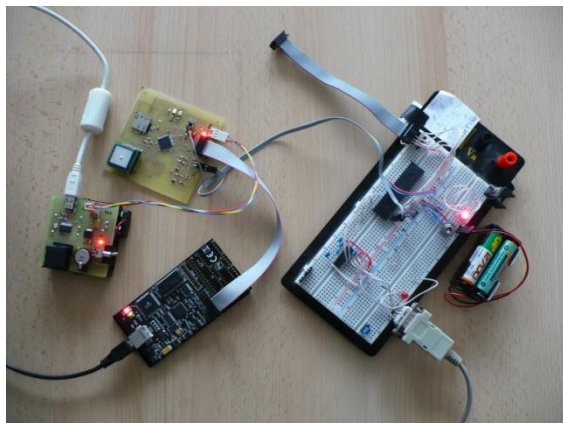
Obrazec DPS TOP



Osazovací plán TOP



PŘÍLOHA G



PŘÍLOHA H

